

1 Lösungsansätze zur Wirtschaftlichkeit im System Fahrzeug-Fahrweg

Von Markus Barth, RAILplus AG mit Ergänzungen von Yves Putallaz, IMDM

1.1 Vorbemerkungen zur Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems

Die vom BAV beauftragte, temporäre Systemaufgabe Interaktion Fahrzeug / Fahrweg Meterspur hat das übergeordnete Ziel «...den Meterspurbahnen mit Hilfe eines integrierten, koordinierten Wissensmanagements in der Interaktion Lösungen bereitzustellen, welche es ihnen ermöglichen die Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems Fahrzeug/Fahrweg markant zu verbessern. Kostensenkungen in den Teilsystemen Infrastruktur und Verkehr sollen umgesetzt und künftige in diesem Zusammenhang stehende Kostenanstiege vermeiden werden.»

Die Systemaufgabe hat nun rund einen Drittel der zur Verfügung stehenden Zeit genutzt, um die Ist-Situation zu analysieren, bestehendes Wissen zusammenzutragen und erste Lösungsansätze aufzuzeigen.

In diesem Sinne soll der nachfolgende Artikel eine gut leserliche Zusammenfassung abgeben, um die heute bereits bekannten, massgebenden Hebel der Gesamtwirtschaftlichkeit des Systems Fahrzeug/Fahrweg zu erkennen und Lösungen auf Basis bestehenden Wissens aufzuzeigen.

Um die Zusammenhänge nachvollziehen und einordnen zu können ist eine Sicht über die Finanzierungsmechanismen, die technischen Zusammenhängen und die Grundlagen des Assetmanagement (von Fahrzeugen / Fahrweg) eine Voraussetzung.

1.2 Die Finanzierung der Meterspurbahnen (Teilsysteme Infrastruktur Rollmaterial)

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Aspekte zur Finanzierung der Meterspurbahnen zusammengefasst. Ausführlicher wird das Thema im Wissensmodul «Die Finanzierung der Fahrzeuge und des Fahrweges» [366] betrachtet.

1.2.1 Finanzierung des Verkehrs (inklusive Rollmaterial)

Die Besteller des regionalen Personenverkehrs sind Bund und Kantone. Das Verkehrsangebot wird von den Bestellern festgelegt und die dafür benötigten Abgeltungen werden mit ihnen ausgehandelt. Alle Kantone mit einem Halteort auf ihrem Kantonsgebiet bezahlen an einer Linie im RPV mit. Das BAV übernimmt je Kanton einen Teil der Abgeltungen, beteiligt sich so an der Bestellung des RPV.

Die Besteller bezahlen die Kosten, welche nicht mit Kundenerträgen gedeckt werden können, in Form von Abgeltungen. Deshalb ist das Ziel im RPV ein ausgeglichenes Ergebnis auf Basis einer möglichst hohen Plangenaugigkeit zu erreichen. Gewinne sind nicht das Ziel der Planrechnung, da sonst die öffentliche Hand diese über höhere Abgeltungen bezahlen müsste.

Die Besteller bezahlen die Abgeltungen der Angebotsvereinbarung RPV auf Basis einer Offerte und nicht die tatsächlich benötigte Abgeltung Ende Jahr. Bei Abweichungen der Kosten und Erlöse zur Offerte (Plan) resultieren Verluste und Gewinne. Verluste und Gewinne werden den gesetzlichen Reserven PBG Art. 36 zugewiesen und so verrechnet.

Basierend auf der Nachkalkulation des Vorjahrs wird eine Offerte für die nächste Fahrplanperiode (2 Jahre) erstellt und im April abgegeben. Die Offerte wird verhandelt und die Besteller bestimmen den Angebotsumfang bis August. Anschliessend erstellt die Unternehmung die finale Offerte für die Abgeltungen gemäss bestimmtem Angebot.

Investitionen führen zu Folgekosten wie Betriebs-, Fremdkapital- und Abschreibungskosten, welche in die Angebotsvereinbarung mit den Bestellern einfliessen und mit Abgeltungen bezahlt werden müssen. Aus diesem Grunde gibt es Vorgaben, was bei der Umsetzung

beachtet werden muss. Werden die Vorgaben nicht eingehalten, führt das dazu, dass die Unternehmung, im schlechtesten Fall, für Folgekosten nicht abgegolten wird.

Alle Investitionen in Fahrzeuge müssen von den Bestellern genehmigt werden. Sie sind Bestandteil des im Rahmen der Angebotsvereinbarung abzugebenden, verbindlichen Investitionsplans. Auf Wunsch der Besteller ist bei grösseren Investitionen in bestehendes Rollmaterial oder Werkstätten ergänzend eine explizite Genehmigung notwendig. Für neues Rollmaterial ist immer eine explizite Genehmigung für Betriebsmittelbeschaffungen nötig.

Im RPV finanzieren die EVU die Investitionen mit Darlehen auf dem Kapitalmarkt. Die Besteller im RPV bezahlen die Investitionsfolgekosten, sofern eine Genehmigung nach Art. 19 ARPV vorliegt. Die Investition wird mit den jährlichen Abschreibungen während der gesamten Nutzungsdauer der Anlage über die Abgeltungen zurückbezahlt. Bei Darlehen auf dem Kapitalmarkt fallen Zinskosten an. Die Zinskosten können ebenfalls als Abgeltung geltend gemacht werden. Die Darlehen werden mit den Abschreibungsmitteln zurückbezahlt.

Fazit 1:

Bund und Kantone, als Besteller des RPV, finanzieren die ungedeckten Folgekosten der Fahrzeugbeschaffungen und der Instandhaltung über die Lebensdauer. Damit finanzieren sie direkt die höheren Beschaffungskosten durch fahrwegschonende Fahrzeugkonstruktionen und Mehrkosten in der Instandhaltung ausgelöst durch eine suboptimale Interaktion Fahrzeug/Fahrweg (Verschleiss).

1.2.2 Finanzierung der Eisenbahninfrastruktur

Die Eisenbahninfrastruktur wird vollständig durch den Bund über den Bahninfrastrukturfonds (BIF) finanziert. Der BIF wird zum grössten Teil aus der Bundessteuer gespeisen. Jeder Kanton leistet Pauschalbeiträge in den BIF.

Der BIF finanziert den Substanzerhalt, den Betrieb und den Ausbau der Eisenbahninfrastruktur.

Zur Infrastruktur gehören alle Bauten, Anlagen und Einrichtungen, die im Rahmen des Netzzugangs gemeinsam benützt werden müssen. Also auch den Fahrweg.

Der BIF bezahlt die Kosten, welche nicht mit Erlösen der Infrastruktur gedeckt werden können, in Form von Abgeltungen. Deshalb ist das Ziel in der Infrastruktur ein ausgeglichenes Ergebnis auf Basis einer möglichst hohen Plangenaugigkeit zu erreichen. Gewinne sind nicht das Ziel der Planrechnung, da sonst die öffentliche Hand diese über höhere Abgeltungen bezahlen müsste. Der BIF bezahlt die Betriebs-Abgeltungen der Infrastruktur basierend auf der vereinbarten Leistungsvereinbarung und nicht die tatsächlich benötigte Abgeltung Ende Jahr. Der BIF bezahlt hingegen die tatsächlich angefallenen Abschreibungen und NAI Ende Jahr. Bei Abweichungen der Betriebskosten und –erlöse zum Plan resultieren Verluste und Gewinne. Verluste und Gewinne werden den gesetzlichen Reserven EBG Art. 67 zugewiesen und so verrechnet.

Investitionsmittel kommen aus dem BIF und sind ein Teil der vierjährigen Investitionen der Infrastrukturbetreiberin (ISB) Leistungsvereinbarung mit dem Bund.

Die ISB erhält Abschreibungsabgeltungen für die bestehenden Anlagen und Abgeltungen für nicht aktivierbare Investitionen (NAI) aus Projekten. Übersteigt der Investitionsbedarf die Abschreibungen, werden ergänzend sogenannte "bedingt rückzahlbare Darlehen" aus dem BIF gewährt.

Die Investitionen werden zum Zeitpunkt des Anfalls durch den BIF finanziert. ISB dürfen keine Finanzierungen für die Eisenbahninfrastruktur ausserhalb des BIF vornehmen. Die Investitionen müssen in der zur Leistungsvereinbarung gehörenden Investitionsplanung oder in einer Programmänderung enthalten sein.

BIF-Darlehen müssen im Grundsatz nicht zurückbezahlt werden und es fallen keine Zinskosten an. Bei einer Zweckentfremdung oder Veräusserung müssen die Darlehen allerdings zurückgezahlt werden (SuG, Art. 29).

Investitionen und Betriebskosten müssen in der Leistungsvereinbarung rechtzeitig abgebildet werden. Dies kann bis zu fünf Jahre vor dem betroffenen Zeitpunkt sein. Im Herbst 2023 werden die Mittel für die Leistungsvereinbarung 2025-2028 festgelegt.

Für Anpassungen des Investitionsplans während der LV-Dauer sind rechtzeitig Programmänderungen zu vereinbaren. Sie dürfen nicht zu einer Erhöhung der vereinbarten Investitionssumme über die gesamte LV-Periode führen.

Anpassungen der Betriebskosten während der LV-Dauer führen zu einem Verlust (Mehrkosten) oder Gewinn (Minderkosten). Sie können erst in der nächsten LV angepasst werden.

Fazit 2:

Der Bund finanziert die ungedeckten Kosten der Bahninfrastruktur über den Lebenszyklus. Damit finanziert er die höheren Beschaffungskosten eines lebenszyklusorientierten Fahrwegs (höhere Ausgangsqualität) genau so wie, Mehrkosten in der Instandhaltung ausgelöst durch eine suboptimale Interaktion Fahrzeug/Fahrweg (Verschleiss). oder durch verspätete Erneuerung, aber auch kürzere Lebensdauern durch zu wenig Unterhalt (Abschreibungen).

1.2.3 Hoheitliche Randbedingungen

Die Strategie der EU besteht seit den 1970er Jahren darin, die Modernisierung der

Eisenbahnen zu fördern, indem sie versucht den Wettbewerb in Unternehmungsstrukturen zu bringen, die aufgrund ihrer Kapitalintensität und volkswirtschaftlichen Bedeutung im Wesentlichen monopolistisch geprägt sind. Diese Strategie hat je nach Land zu einer mehr oder weniger grossen Umgestaltung der Bahnbranche mit folgenden Hauptausprägungen geführt:

- Trennung der Infrastrukturbetreiber von den Eisenbahnverkehrsunternehmen, die je nach Land mehr oder weniger streng gehandhabt wird
- Auslagerung von betriebsnahen Dienstleistungen wie Weichenherstellung (Schweden), Instandhaltung der Infrastruktur (Niederlande als Extrembeispiel), Instandhaltung von Fahrzeugen.

Diese Aufteilung zielt darauf ab, Aktivitäten mit geringerer Kapitalintensität und einfacheren Spezifikationen zu isolieren, sie für den Wettbewerb zu öffnen und die Eisenbahnbranche zu wirtschaftlicheren Leistungen zu bewegen. Bei der Privatisierung wurden keine Maßnahmen vorgesehen, um systemspezifische, technische Systemverknüpfungen einzuführen. In der Folge gibt es dadurch Akteure die ihre Rentabilität auf Kosten anderer, insbesondere der öffentlichen Geldgeber, steigern. Da die Summe dieser eigenen Optima nicht gleich dem Optimum der Summe ist, tendiert das individuelle wirtschaftliche Verhalten der Akteure nicht zur Optimierung des gesamten Eisenbahnsystems. Dies macht sich im Besonderen bei der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrweg bemerkbar. Überlagert wird dies durch das teilweise fehlende Fachwissen. In der Normalspur wurden erste Steuerungsmechanismen wie das verschleissabhängige Trassenpreissystem eingeführt, um hier regulatorisch einzugreifen.

Die Meterspurbahnen in der Schweiz sind vorab charakterisiert durch eine Vielzahl von integrierten Unternehmungen mit Netzen, die mehrheitlich nicht miteinander verbunden sind und mehr oder weniger homogenen Fahrzeugflotten. Die Vielfalt der Meterspur zeigt sich auch in der Charakteristik der Netze in Bezug auf die Topographie, den hauptsächlichen Verwendungszweck (urbaner Verkehr, Tourismus oder Grunderschliessung) und damit der volkswirtschaftlichen Bedeutung. Die hierzu angewandten Technologien sind entsprechend vielfältig (kurze Zugfolgen, hohe Beschleunigungen, enge Radien, hohe Steigungen, Zahnradstrecken, etc). Es gibt weiter eine Reihe von technologischen Unterschieden, die aus der Vergangenheit übernommen wurden und die die gemeinsame Nutzung von Lösungen durch verschiedene Meterspurbahnen erschweren.

Alle gemeinsam haben sie die finanzielle Trennung von Verkehr und Infrastruktur (auch innerhalb der integrierten Unternehmungen). Die unter 2.1 und 2.2 beschriebenen unterschiedlichen Finanzierungsmechanismen führen auch bei der Meterspurbranche zu unterschiedlichen, finanziellen Ausgangssituationen innerhalb der Unternehmungen. Die Verkehrsbereiche, insbesondere auf gering ausgelasteten Relationen, stehen unter einem zunehmend grossem finanziellen Druck. Rollmaterialbestellungen wurden über die letzten Jahre, bedingt durch die erhöhten Anforderungen und der Monopolsituation im Lieferantenmarkt eher kostenintensiver. Die hohen Personalkosten und Leistungsanforderungen im Betrieb führen zu einer weiteren Verschärfung des Kostendrucks.

Im Bereich der Infrastruktur wurde mit der Bahninfrastrukturfinanzierung (BIF) ein Instrument geschaffen, welches eine bis heute genügend bis gute Ausfinanzierung des Fahrweges ermöglicht. Erwähnenswert ist hierbei, dass die Investition (Totalerneuerung Fahrweg) in der Praxis besser ausfinanziert ist, als der Betrieb der Infrastruktur (Erfolgsrechnung mit Wartungsarbeiten wie zum Beispiel Stopfen, Schleifen, etc). Dies kann dazu verleiten, dass die im Lebenszyklus vorgesehene Nutzungsdauer bedingt durch zu geringen Unterhalt nicht erreicht wird und eine verfrühte Re-Investition in Kauf genommen wird.

Fazit 3:

Der Bund finanziert bei den Meterspurbahnen über den RPV und die Infrastruktur insgesamt rund drei Viertel der ungedeckten Kosten. Das Interesse an einer lebenszyklusorientierten Gesamtsystemoptimierung ist deshalb hier am grössten.

1.2.4 Sicht der Infrastrukturbetreiber

Die Infrastrukturbetreiber (ISB) streben kurz-, mittel- und langfristig ein Gleichgewicht zwischen Einnahmen und Kosten an.

- Einerseits seine Einnahmen, die er durch die Leistungsvereinbarung und den Verkauf von Trassen erhält
- Andererseits die Kosten für den Betrieb, die Überwachung, die Instandhaltung und die Erneuerung der Infrastruktur

Die Tätigkeit des Infrastrukturmanagements ist in der Regel stark subventioniert; daher wird das Streben nach Effizienz hauptsächlich durch den Druck motiviert, den die bestellende Behörde bei der Aushandlung von Leistungsvereinbarungen ausübt. Als Massnahmen zur Optimierung der Leistung (bei gegebener Qualität), welche Infrastrukturbetreiber in der Regel ergreifen, sind zu nennen:

- Verringerung der Abnutzung der Infrastruktur, um ihre Lebensdauer zu verlängern und gleichzeitig die Instandhaltungskosten so niedrig wie möglich zu halten.
- Die Suche nach einem angemessenen Gleichgewicht zwischen Instandhaltungs- und Erneuerungsausgaben, d.h. die Optimierung der Lebenszykluskosten der Komponenten und die Werterhaltung einer guten Substanz der Infrastruktur (gewichtetes durchschnittliches, relatives Alter).

Die Verringerung der Abnutzung hängt von den physischen Auswirkungen der Fahrzeuge auf den Fahrweg sowie von der Anfangsqualität des Fahrweges ab. Die Auswirkungen der Fahrzeuge werden im Wesentlichen durch deren Interaktionsverhalten bestimmt, d.h. in erster Linie durch die Konstruktion der -Fahrwerke und ihrer Verbindung mit den Wagenkästen.

Das Gleichgewicht zwischen Investition und Instandhaltung hängt von der technischen und wirtschaftlichen Eignung der Instandhaltungspolitik (Typologien und Wartungsrythmus, Lebensdauer) und der eingesetzten Technologien ab.

1.2.5 Sicht der Eisenbahnverkehrsunternehmen

Die Aktivitäten im RPV werden ebenfalls stark subventioniert; daher wird das Streben nach Effizienz

hauptsächlich durch den Druck motiviert, den die Besteller (Kantone) bei der Aushandlung von RPV-Angeboten ausüben. Zusätzlich zu den beiden Optimierungsmöglichkeiten der Infrastrukturbetreiber können die Eisenbahnverkehrsunternehmen folgende drei (zusätzlichen) Anforderungen, bei gegebenem Qualitätsniveau der Dienstleistung, stellen:

- Reisekomfort verbessern (stufenfreie Einstiege, Klimaanlage)
- Die Umsetzung einer optimierten Rollmaterial-Personal-Disposition, um die Anzahl der produzierten Zugkilometer zu maximieren und den Personalaufwand zu minimieren. Dies geschieht insbesondere durch die Anschaffung von Zügen mit hohem Beschleunigungsvermögen und der generellen Kürzung der Fahrzeiten mit Erhöhung der Geschwindigkeiten bis hin zur Ausnutzung der Maximalgeschwindigkeiten
- Senkung der Kosten für die Instandhaltung und Abschreibung des Rollmaterials. Dies erfolgt kurzfristig durch kostengünstigere Beschaffungen (Fokus Abschreibungen) oder langfristig durch Optimierung der Lebenszykluskosten (Fokus LCM), was sich so oder so auf die Konstruktion der Laufwerke direkt auswirkt.

1.2.6 Sicht auf die Rollmaterialindustrie

Im Bereich der Meterspurfahrzeuge besitzt Stadler Rail AG ein defacto Monopol. De jure wird öffentlich ausgeschrieben aber in den meisten Fällen ohne Angebot durch einen zweiten Anbieter. Die Monopolsituation fördert weder die Effizienz noch die Innovationskraft. In Anbetracht der sehr geringen Losgrößen und dem grundsätzlichen Risiko den Monopollieferanten auch noch zu verlieren stellt sich die Frage, ob nicht neue Formen der Zusammenarbeit gesucht werden sollten. Dies verbunden mit maximaler Wiederverwendung bereits existierender Technologien und der Einführung der industriellen Logik einer Produktplattform Rollmaterial Meterspur. Immer unter dem Aspekt die Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus im Bereich Rollmaterial deutlich erhöhen zu können. Normung und Standardisierung spielen hier eine wichtige Rolle, insbesondere bei den obenerwähnten Fahrwerken (für die wichtigsten Anwendungsfälle: schnell, kurvenreich, zahnradbetrieben).

1.3 Die Gesamtsystembetrachtung

1.3.1 Zusammenhänge Fahrzeug / Fahrweg – eine Einordnung aus Sicht der Interaktion

Das Wissen um das interaktive Verhalten des Rad/Schiene-Systems und seinen Auswirkungen wird seit je her erforscht. Die Treiber waren jeweils die Gewährleistung der Sicherheit, die Änderung der Nutzungsbedingungen (Hochgeschwindigkeit, Schwerlast) aber auch Auswirkungen in Form von Verschleiss (Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit) sowie der Umweltauswirkungen (Lärm und Erschütterung).

Mit dem Anstieg der Geschwindigkeiten, der Achslasten und dem Einsatz von Hochleistungsfahrzeugen haben die staatlichen Normalspurbahnen nach dem 2. Weltkrieg vermehrt auf eine Zusammenarbeit gesetzt. Im Rahmen der UIC wurde in diversen ORE-Ausschüssen (ORE: Forschungs- und Versuchsamt der UIC) nach Antworten auf die wichtigsten Fragen hinsichtlich Sicherheit, Geschwindigkeit, Standardisierung und Lärm gesucht. Mit der Bahnreform auf europäischer Ebene (Trennung Verkehr / Infrastruktur) und der Schaffung neuer Zuständigkeiten wurden diese Aktivitäten unter den Bahnen mehrheitlich beendet und in Industrie und Hochschulen verlagert.

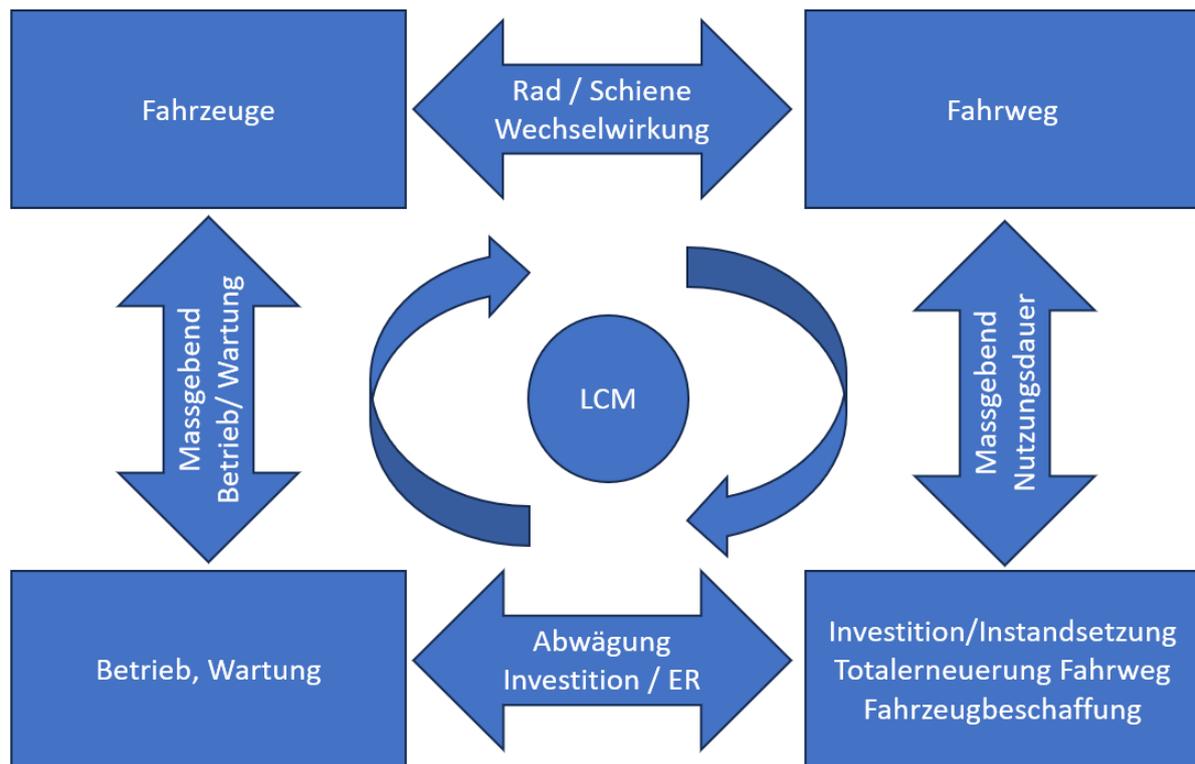


Abbildung 1: Abhängigkeiten in der Gesamtsystembetrachtung Fahrzeug / Fahrweg

Bei den Meterspurbahnen erwies sich die Notwendigkeit zur wirtschaftlichen Optimierung Rad/Schiene lange Zeit als untergeordnet. Punktuelle technische Herausforderungen Rad/Schiene wurden, zusammen mit der Industrie, integral und oft mit mehr oder weniger erfolgreichen, pragmatischen Lösungsansätzen angegangen. Vertiefte Kenntnisse in der Interaktion Rad/Schiene waren infolge der oft fehlenden Herausforderungen nicht notwendig.

Die Entwicklung der Branche hat auch bei den Meterspurbahnen nicht Halt gemacht. Der Taktfahrplan und die steigende Nachfrage führten zu höheren Zugzahlen mit höherem Platzangebot (Zuglängen). Gleichzeitig stiegen die Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen an die Fahrzeuge (Klima, Passagierausrüstung, Maximalgeschwindigkeit, Crashesicherheit, etc) was zu deutlich höheren Fahrzeuggewichten führte. Enge Taktfahrzeiten erforderten den Einsatz von Fahrzeugen mit hohen Antriebsleistungen sowie hohem Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen.



Abbildung 2: Die MGB – eine der vom zunehmenden Verschleiss meistbetroffenen Bahnen

Unter dem Kostendruck bei den Verkehrsunternehmen wurden die Fahrzeuge im Lebenszyklus optimiert. Dies führte zu teilsystemoptimierten Konstruktionen mit weniger Radsätzen und deutlich höheren Achslasten. Stellvertretend seien hier die GTW-Fahrzeuge und die Fahrzeuge mit aufgesattelten Wagenkästen, sowie die Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen genannt.

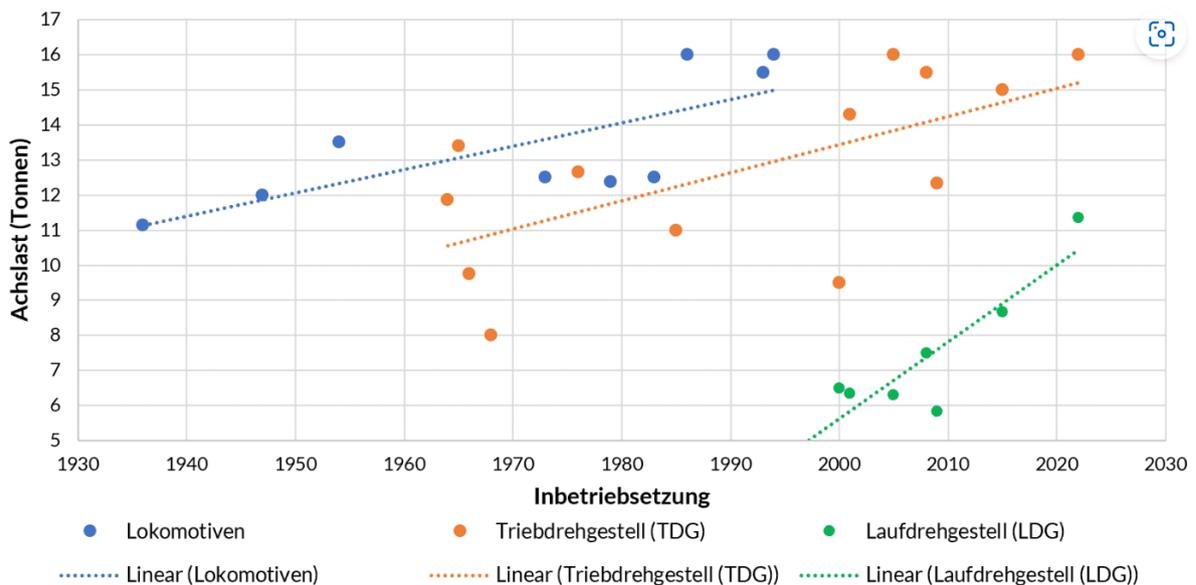


Abbildung 3: Entwicklung der Achslasten beim Meterspurrollmaterial

Überlagert wird der generelle Anstieg der Achslasten mit der Auslegung der Fahrzeuge für höhere Geschwindigkeiten. Dies unabhängig davon, ob eine betriebliche Notwendigkeit gegeben ist oder nicht. Die Anforderung nach höheren Geschwindigkeiten ziehen oft grössere Achsabstände in den Drehgestellen und/oder steifere Anbindungen der Radsätze an die Fahrwerke nach sich.

Die fahrzeugseitigen Entwicklungen in der Konstruktion führten meist bei Bahnen mit Bogenradien unter 250m zu zunehmendem Verschleiss und Schädigungen an Rädern und Schienen. Seitens der Fahrzeuge wurde versucht dem mit widerstandsfähigeren Radmaterialien zu begegnen, während die Fahrwegbauer mit grösseren, widerstandsfähigeren Schienenprofilen (Flächenträgheitsmoment, Stahlqualität) und Betonschwellenoberbau versuchten den Verschleiss zu beherrschen. Das Vorgehen wurde dabei interaktiv kaum abgestimmt. Die derzeit verwendeten und in den Regelwerken der Meterspur aufgeführten Rad- und Schienenprofile sind dementsprechend nicht aufeinander abgestimmt und in der Folge für ein verschleissarmes Fahren in diesen engen Bögen nicht geeignet.

Fazit 4:

Bahnen mit engen Bogenradien (unter 250m) und erhöhten Achslasten (gegen 16t) sind besonders von zunehmendem Verschleiss Rad/Schiene betroffen.

1.3.2 Aufbau des interaktiven Wissens in der Meterspur

Mit den rasch ansteigenden Anforderungen an die Fahrzeuge und die Fahrbahn hat sich der Wissensbedarf bei diversen Meterspurbahnen grundlegend geändert. Ausgelöst durch die starken Verschleisserscheinungen bei einigen Meterspurbahnen hat das Bundesamt für Verkehr daher eine temporäre Systemführerschaft «Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur» beauftragt. Diese hat die herausfordernde Aufgabe, die Verschleiss- und Schädigungsmechanismen zu erkennen, Lösungen vorzuschlagen und damit die Gesamtwirtschaftlichkeit zu steigern. Zur Analyse der Situation und der Erarbeitung von Lösungen ist viel technisches Wissen und praktische Erfahrung gefragt, was in der Schweiz aber auch in Europa nur noch spärlich vorhanden ist und auf die Meterspur umgelegt werden muss. Die gewonnenen Erkenntnisse und Resultate werden laufend der ganzen Branche zur Verfügung gestellt.

1.4 Der Lebenszyklus der Fahrzeuge und des Fahrwegs

1.4.1 Einige Grundlagen zum Lebenszyklusmanagement

Eine Gesamtsystemoptimierung muss sich am wirtschaftlichen Gesamtergebnis des Systems Fahrzeug/Fahrweg messen. Sowohl die Fahrzeuge als auch der Fahrweg sind sehr langlebige Systeme und bedürfen einer nachhaltigen Bewirtschaftung, um die Lebenszykluskosten optimieren zu können. Dieser Lebenszyklus erstreckt sich von der Beschaffung (Konzeption, Materialisierung), über den Betrieb (betriebliche Verwendung, Wartung und Instandsetzung) bis zur Liquidation.

Bei den Fahrzeugen werden rund 80% der Lebenszykluskosten in der Konzeption (Konstruktion/ Planung) festgelegt. In dieser Phase wird auch die Konzeption des Laufwerks mit den interaktiven Haupteinflussfaktoren Achslast und Bauart der Fahrwerke entschieden, welche mit vertretbarem Kostenaufwand über die Restlebensdauer der Fahrzeuge nicht mehr verändert werden können.

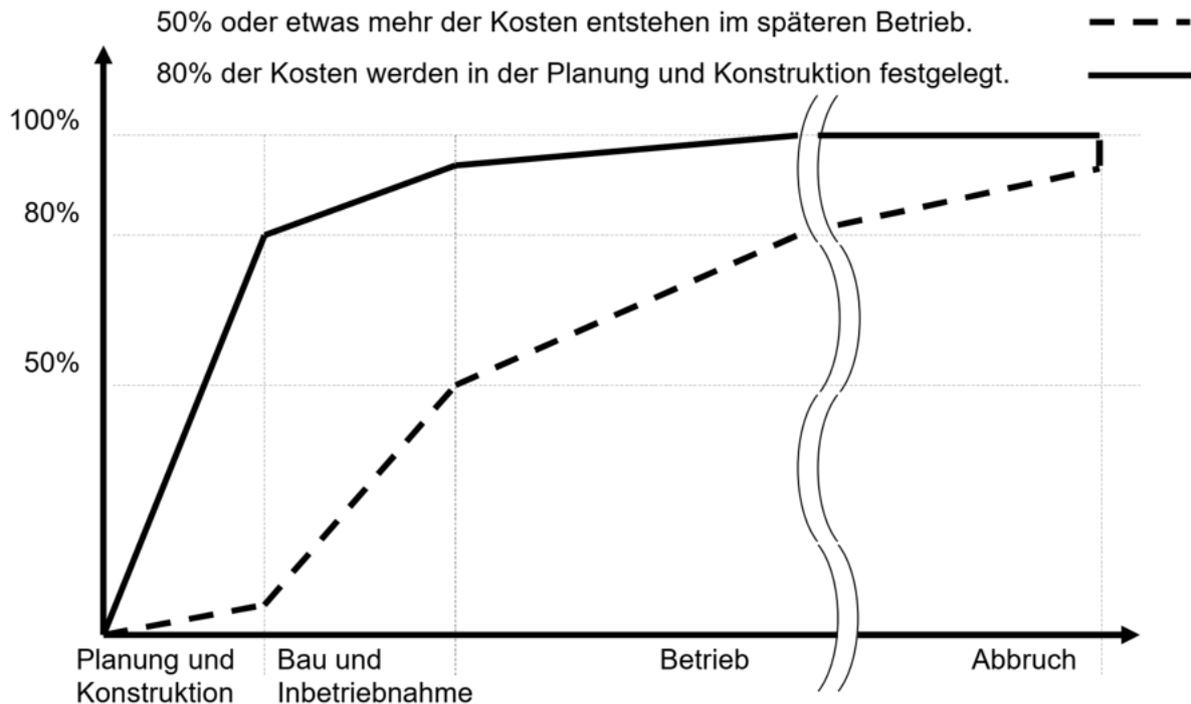


Abbildung 4: Festlegung und Verteilung der Lebenszykluskosten der Fahrzeuge (Bild: eduRail)

Fazit 5:

Bei den Fahrzeugen werden mit der Konzeption rund 80% der Lebenszykluskosten festgelegt und damit auch die interaktiven Haupteinflussgrößen wie Achslast und Fahrwerkkonstruktion.

Auch beim Fahrweg werden die konzeptionellen Entscheide (System Unterbau, Schwellen) bereits zu Beginn der Lebensdauer getroffen. Diese wirken sich ebenfalls langfristig auf die Interaktion aus. Wie dies auch die Einbauqualität tut. Zusätzlich zur Konzeption kommt der Instandhaltung über den Lebenszyklus eine herausragende Bedeutung zu. Übergeordnetes Ziel ist es den Fahrweg möglichst lange in gebrauchstauglichem Zustand zu erhalten. Die theoretische Nutzungsdauer muss erreicht, nach Möglichkeit übertroffen werden. Hierzu müssen die notwendigen Instandhaltungsarbeiten regelmässig getätigt werden. Insbesondere die Schienen (richtig) geschliffen werden und mit Stopfungen die Gleislage reguliert werden, um Folgeschäden zu vermeiden.

Fazit 6:

Beim Fahrweg werden mit der Konzeption (Unterbau, Schwellentyp) wichtige Entscheide zu den Folgekosten im Lebenszyklus getroffen. Um die theoretische Nutzungsdauer zu erreichen, muss die notwendige Instandhaltung (regelmässiges Schienenschleifen und die Regulierung der Gleislage durch Stopfen) durchgeführt werden.

Bei der wirtschaftlichen Gesamtsystembetrachtung des Systems Fahrzeug/Fahrweg ist die Herausforderung, dass die beiden Lebenszyklen der Fahrzeuge und des Fahrwegs sich in allen Lebenszyklusphasen gegenseitig beeinflussen. Sei es bei der Konzeption, bei der Materialisierung in der Umsetzung aber auch bei Entscheiden die Nutzung, Wartung und Instandsetzung betreffend. Die gegenseitige Abstimmung im Gesamtsystem muss laufend erfolgen.

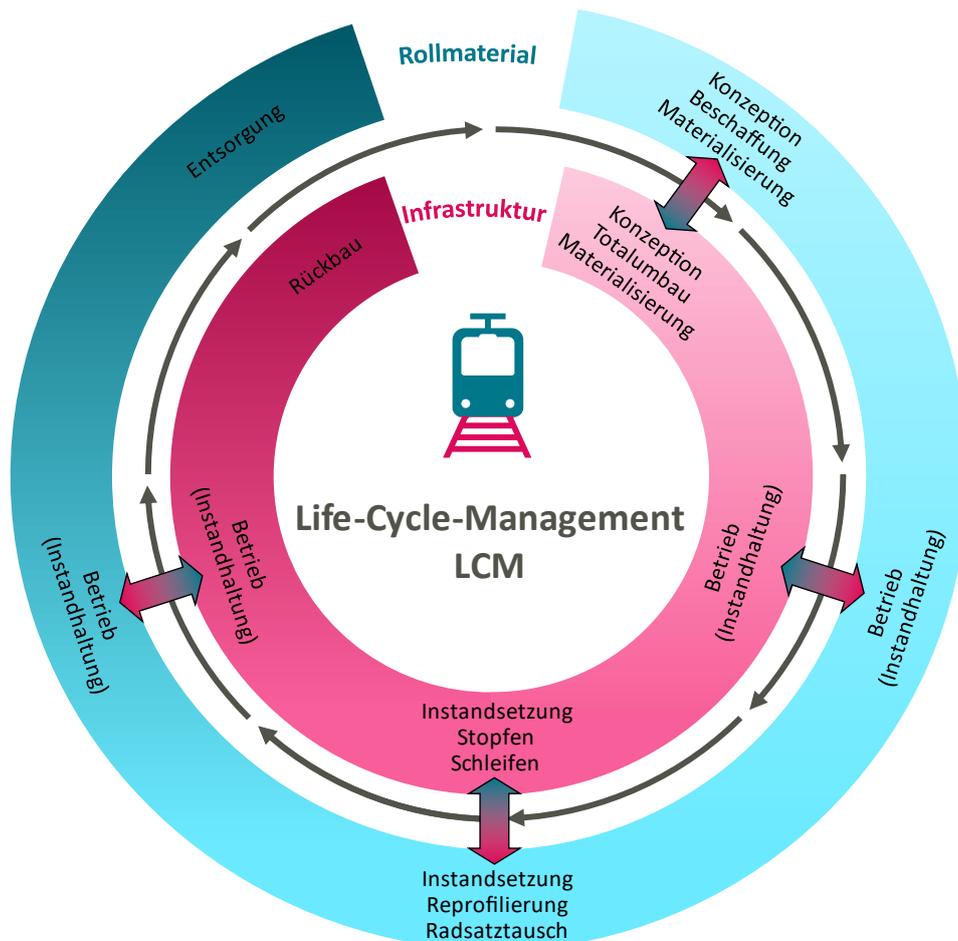


Abbildung 5: Auf den Lebenszyklen der Fahrzeuge und des Fahrwegs beeinflussen sich getroffene Entscheidungen jeweils gegenseitig

Fazit 7:

Die beiden Lebenszyklen Fahrzeuge und Fahrwege beeinflussen sich in allen Lebenszyklusphasen gegenseitig. Sei es bei der Konzeption, bei der Materialisierung in der Umsetzung aber auch bei Entscheidungen die Nutzung, Wartung und Instandsetzung betreffend. Die gegenseitige Abstimmung im Gesamtsystem muss laufend erfolgen.

Nach Abbildung 1 und Abbildung 5 ergeben sich Zielkonflikte, aber auch gemeinsame Interessen, der Bereiche Fahrzeug und Fahrweg. Diese Punkte sollen nachfolgende in den Teilbereichen Fahrzeug und Fahrweg erläutert werden.

1.4.2 Teilbereich Fahrzeuge

1.4.2.1 Grundlagen

Bei den Fahrzeugen werden in der Planung und Konstruktion bereits 80% der Lebenszykluskosten festgelegt. Das bedeutet, dass der Konzeption der Fahrzeuge eine sehr große Bedeutung beizumessen ist. Diese hat sich an den zukünftigen Einsatzbedingungen und deren Bedürfnissen zu optimieren. Der Erfolg dieser Beschaffungsoptimierung hängt maßgeblich von folgenden Kriterien ab:

- Die Einsatzbedingungen müssen hinlänglich bekannt sein
- Die Auswirkungen der jeweiligen Konstruktionen auf die Lebenszykluskosten müssen bekannt sein (u.a. Interaktionswissen).

- Die Investition und allfällige Mehrkosten zur Systemoptimierung bei Beschaffung und Betrieb müssen finanzierbar sein (finanzielle Anreize)
- Der notwendige, zeitliche Vorlauf zur Optimierung muss im Beschaffungsvorgang vorhanden sein
- Die hoheitlichen Vorgaben müssen die Optimierung zulassen oder mit vertretbarem Aufwand erfüllbar sein
- Die Fahrzeugindustrie muss die notwendigen Konstruktionen anbieten können

Generell fallen bei der Beschaffung hohe Einmalkosten an, die unabhängig von den bestellten Stückzahlen sind. Weil die Komponentenbeschaffungen bei Unterlieferanten kundenprojektorientiert erfolgt, wirken sich kleine Bestellmengen auch hier nachteilig auf die Kosten aus. Erst ab einer Bestellmenge von rund 50 Stück erwarten die Hersteller kostenrelevante Skaleneffekte. Diese Bestellmengen werden bei den Meterspurbahnen normalerweise nicht erreicht, auch wenn auf Fahrzeugplattformen aufgebaut wird. Individualisierungen auf Wunsch der TU schränken die Produktionslosgrößen weiter ein. Werden bei Nachbestellungen Anpassungen an sicherheitsrelevanten Bauteilen vorgesehen gehen die Skaleneffekte ebenfalls verloren. WTO-Ausschreibungen für Rollmaterialbeschaffungen erfordern weiter Spezialkenntnisse.

Im Betrieb der Fahrzeuge fallen die Lebenszykluskosten wie Abschreibungen, die Zinsen und die Instandhaltung an. Bei der Instandhaltung interessieren uns hier vor allem die Fahrwerkskosten.

Fazit 8:

Kleine Losgrößen bei den Fahrzeugen führen zu hohen Einmalkosten bei der Beschaffung und Ersatzteilbeschaffung sowie einem sehr hohen Engineeringaufwand seitens der Bahnen. Fahrwerke sollten hinsichtlich Interaktion auf einer stabilen Plattform für die massgebenden Anwendungszwecke basieren.

1.4.2.2 Fahrzeugkonzepte und Fahrwerke

Aus einer Vielzahl theoretisch möglicher Fahrzeugkonzepte für die Meterspur wurden im Rahmen der Systemaufgabe 12 realistische Zugskonzepte ermittelt (Abbildung 6). Mit total 6 lokbespannten Zügen, 2 Zügen mit Antriebsmodulen und 4 Triebzügen mit jeweils unterschiedlichen Fahrwerkskonzepten kann ein vollständiges Bild des technisch Sinnvollen aufgezeigt werden.

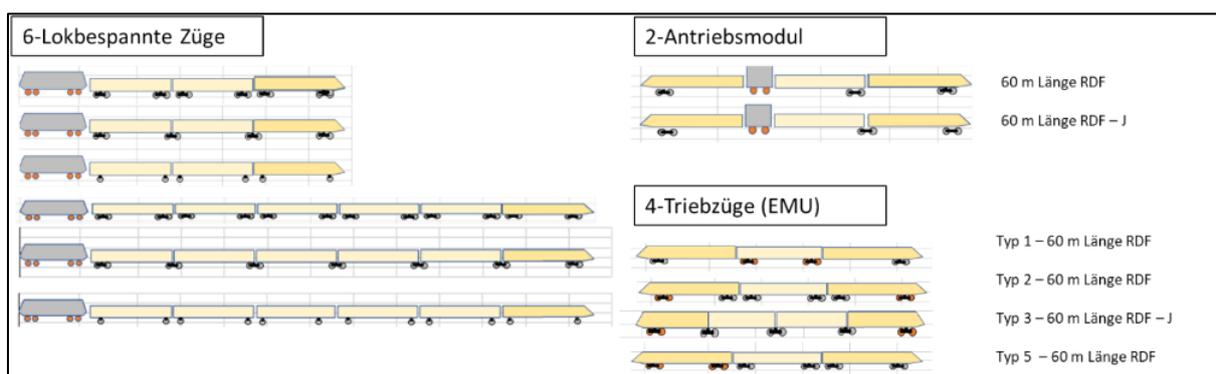


Abbildung 6: Unterschiedliche Zugskonzepte (Bild: RAILpus/RSE)

Die Fahrwerke aller heute bestehenden Fahrzeuge sind, bis auf eine Ausnahme, mit einer steifen Radsatzführung ausgerüstet. Die Längssteifigkeiten liegen in der Regel bei ca. 10 kN/mm oder mehr, und lassen damit keine Radialeinstellung der Radsätze in den Bögen zu. Sie sind damit nicht geeignet für ein verschleissarmes Befahren von Bögen mit kleinen bis mittleren Bogenradien.

Fazit 9:

Die Fahrwerke der heute bestehenden Fahrzeuge sind mit steifen Radsatzführungen ausgerüstet und lassen damit keine Radialeinstellung der Radsätze in Bögen zu. Sie sind damit nicht für einen verschleissarmen Betrieb in engeren Bögen geeignet.

In der Vergangenheit wurden bei der Normalspur verschiedenste Lösungsansätze entwickelt, mit welchen radiale Einstellungen erreicht, oder zumindest unterstützt werden sollten. Eine Übersicht der verschiedenen Lösungsansätze ist in Abbildung 7 aufgezeigt. Neben den eigentlichen Lösungsansätzen spielt auch deren Empfindlichkeit auf die Berührgeometrie Rad/Schiene sowie die Traktionskraft bzw. den Traktionsschlupf eine wesentliche Rolle.

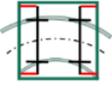
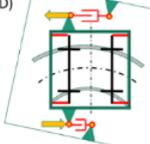
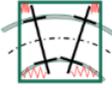
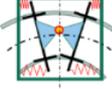
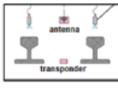
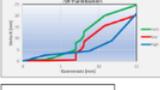
Lösungsansätze		Empfindlichkeit	
Steife Radsatzführung		Aktiver Schlingerdämpfer (ADD)	
Elastische Radsatzführung Inkl. HALL		Losrad / Einzelrad	
Aktive Radsatzsteuerung		Spurkranzschmierung (SKS)	
Gegenseitige Radsatzsteuerung (GGA, Kreuzanker, Scheffel)		Schienenkopf Konditionierung (SKK)	
			Berührgeometrie <ul style="list-style-type: none"> • DR-0 • DR-Grenzbogen • DR-maximal 
			ungefederte Masse Radsatzlast Fahrbahn Steifigkeit 
			Traktionsregelung 

Abbildung 7: Varianten zur Radsatzführung in Drehgestellen (Bild: RAILplus/RSE)

Grundsätzlich unterscheiden wir die steife Radsatzführung (heute der Normalfall in der Meterspur), passive Lösungen zur Radsatzführung wie die elastische Radsatzführungen (inkl. HALL-Lager), gegenseitig gesteuerte Radsätze (GGA) sowie die Los- oder Einzelräder. Bei der GGA-Lösung werden die beiden Radsätze mit einer gegenseitigen Verkopplung versehen, sodass der nachlaufende Radsatz den vorlaufenden Radsatz bei der Radialstellung unterstützt. Die Energie bzw. Kräfte zur Einstellung des vorlaufenden Radsatzes werden durch die Kraftschlusskräfte des nachlaufenden Radsatzes generiert. Weiter aktiv gesteuerte Los- oder Einzelradlösungen, auf welche aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zur Entwicklung und Implementierung hier nicht eingegangen werden soll. Passiven Lösungen sind in der Regel die Nachteile gemein, dass diese bei schlechter, unzureichender Berührgeometrie ihre Funktion zur Selbststeuerung verlieren (ausser GGA), und insbesondere unter Einwirkung von Traktions- oder dynamischen Bremskräften nicht mehr ausreichend steuern. Bei den aktiven Systemen, welche wesentlich teurer in Beschaffung und Instandhaltung sind, verbleibt die aktive Radsatzsteuerung. Diese steuert die Radsätze entsprechend dem Bogenradius in eine radiale oder teilradiale Stellung. Bei engen Bogenradien im Meterspurbereich sowie den konstruktiven Grenzen bestehender Fahrwerke ist davon auszugehen, dass auch bei aktiver Steuerung nicht überall eine vollständige Radialeinstellung realisiert werden kann.

Spurkranzschmierung (SKS) und Schienenkopfkonditionierung (SKK) zielen ausschliesslich auf die Reduktion des Verschleisses bzw. der Schädigungen ab. Diese werden mittels Reduktion der Reibwerte am Spurkranz sowie an der Lauffläche erreicht. Die Räder laufen trotzdem in einem Winkel an der Schiene an, respektive Gleiten auf dem Schienenkopf des inneren und äusseren Schienenstrangs. Da aber mit dem signifikant reduzierten Reibwert die Kraftschlusskräfte reduziert werden vermindern diese den Verschleiss und eliminieren die höherfrequenten Mechanismen im Kontakt Rad/Schiene.

Die beschriebene Vielzahl der Laufwerkskonzeptionen im Detail zu würdigen, würde an dieser Stelle zu weit führen. Neben der massgebenden Radsatzlast muss die Beachtung des Radsatzabstandes im Drehgestell und die Fähigkeit zur Radialeinstellung in engen Bogen betrachtet werden. Für die Beschreibung des Fahrverhaltens in engeren Gleisbögen wird der Radialstellungsindex verwendet.

Die Rollradiendifferenzen auf den konischen Fahrflächen der beiden Räder desselben Radsatzes bestimmen das Führungsverhalten der Radsätze im Gleisbogen. Die Konstruktion des Gleises ist so ausgelegt, dass der Spurkranz des bogenäusseren Rades beim vorlaufenden Radsatz bei der Kurvenfahrt der bogenäusseren Schiene folgt. Da das bogenäussere Rad einen grösseren Weg zurücklegen muss als das bogeninnere müsste dieses über einen grösseren Raddurchmesser verfügen als das bogeninnere. Durch die konischen Laufflächen wird eine Rollradiendifferenz aufgebaut, welche dazu führt, dass das bogenäussere Rad auf einem grösseren Raddurchmesser durch den Bogen rollt als das bogeninnere Rad. Diese Rollradiendifferenz unterstützt den Radsatz bei der Fahrt durch die Kurve reduziert damit den Verschleiss an Rad und Schiene. Ziel wäre, dass sich der Radsatz im Bogen so einstellt, dass er rein rollend (ohne Gleiten) durch den Bogen fahren kann. Andernfalls entsteht durch das Anlaufen des Spurkranzes und das Gleiten der Fahrflächen Verschleiss an Rad und Schiene. Durch kurze Radstände bei den Drehgestellen wird die verschleissarme Fahrt in den Bögen gegenüber grossen Radständen signifikant verringert. Sollen hingegen hohe Fahrgeschwindigkeiten beherrscht werden, führen kurze Radstände in den Drehgestellen und weiche Radsatzführungen zu Instabilitäten. Ein Zielkonflikt, den es technisch zu beseitigen gilt, wenn wirklich gleichzeitig hohe Fahrgeschwindigkeiten beherrscht werden müssen und in grösserem Ausmasse durch enge Bogen gefahren werden muss.

Fazit 10:

Je weniger sich die Radsätze radial einstellen können und je grösser der Achsstand im Drehgestell ist, desto grösser ist der Verschleiss an Rad und Schiene in Bogen. Massgebender Parameter für das Verschleiss-Niveau eines Zuges ist das Produkt aus: (Radsatzlast * Radstand) im Laufwerk.

1.4.2.3 Radstähle

Die Werkstoffbeanspruchung im Rad/Schiene Kontakt hat durch höhere Beschleunigungen und Radsatzlasten in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Nicht nur die Schienenstähle, auch die Radstähle gelangen an ihre Belastungsgrenze. Damit verringern sich die Laufleistungen zwischen den Reprofilierungen der Räder und der Instandhaltungsaufwand steigt zum Teil massiv.

Mit den Überbeanspruchungen der Laufflächen der Räder gehen vor allem in engen Bögen auch periodische Rundheitsabweichungen einher. Zudem entstehen an den Laufflächen Risse als Folge der Rollkontaktermüdung. Ohne rasches Handeln in Form des Überdrehens der Radsätze entstehen tiefe Schädigungen und Materialausbrüche. Analog zu den Schienen wird dann die Reprofilierung immer schwieriger und aufwändiger. Es sind Meterspurbahnen bekannt bei denen ein Radsatz nur zwei bis drei Mal überdreht werden konnte, bevor er ersetzt werden musste. Besonders kostspielig ist dies bei den Zahnradfahrwerken, da diese wegen des Zahneingriffs über einen geringeren Verschleissvorrat verfügen. Insgesamt eine herausfordernde Aufgabe hier ist, die richtige Balance in der Instandhaltung zu finden. So oder so werden Verschleiß und Rollkontaktermüdung bei den Radsätzen zum massgebenden Kostenfaktor.

Höhere Fahrwegsteifigkeiten unterstützen die Bildung von Radunrundheiten, welche dann als Folge zum Anstieg der dynamischen Kräfte auf Räder und Fahrweg führen. Generell werden Stähle gesucht, die einen höheren Widerstand gegen Rollkontaktermüdung und Verschleiss aufweisen. Härtere Stähle zeigen im Betrieb Vorteile gegenüber weicheren. Diese führen zu deutlich geringeren Instandhaltungskosten (grössere Laufleistungen) bei nur leicht höheren Beschaffungskosten. Bisher sind durch derart verbesserte Stahlqualitäten bei den Rädern keine nachteiligen Effekte auf den Fahrweg, insbesondere der Schienen bekannt.

Fazit 11:

Verbesserte Qualitäten bei den Radwerkstoffen wirken sich positiv auf die Laufleistung und verzögern die Bildung von Polygonen. Negative Einflüsse auf den Fahrweg sind bisher nicht bekannt.

1.4.2.4 Radprofile

Die Radprofile in Verbindung mit der Spurweite, den Schienenprofilen und der Schieneneinbauneigung, definiert als äquivalente Konizität, haben einen massgeblichen Einfluss auf das Fahrverhalten bei höheren Fahrgeschwindigkeiten im geraden Gleis. Eine sehr hohe äquivalente Konizität kann bei höheren Geschwindigkeiten zu instabilem Fahrverhalten führen. Andererseits kann diese gleichzeitig durch eine hohe Rollradiendifferenz der Räder im Bogen den Bogenlauf positiv beeinflussen. Es besteht damit ein physikalischer Widerspruch zwischen einem guten Bogenlaufverhalten und der gleichzeitigen Beherrschung von hohen Fahrgeschwindigkeiten. Die Beherrschung dieses Widerspruchs stellt besondere Anforderungen an die Fahrwerkskonstruktion und an die Berührgeometrie Rad/Schiene.

Bei der Konstruktion der Laufwerke müssen daher die Radprofile mit der Fahrwerksanbindung, der Radsatzanlenkung, den Ausdrehwiderständen und den dämpfenden Elementen abgestimmt werden. Eine zu starke Dämpfung erschwert wiederum die Radialstellung des Fahrwerks im Bogen und erzeugt zusätzlichen Verschleiss. Zudem müssen 120km/h auf dafür vorgesehenen Strecken sicher und komfortabel beherrscht werden.

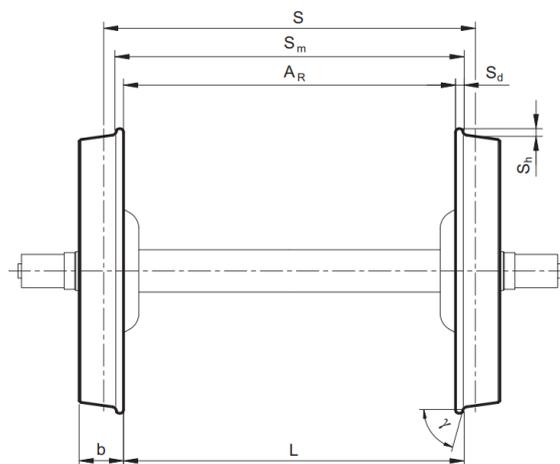


Abbildung 8: Radsatz der Meterspurbahnen (Bild: VöV R RTE 29500)

Heute existieren in der Meterspur verschiedene Radprofile. Aus den Gesichtspunkten der geometrischen Interaktion sind diese d in der R RTE 29500 «Standardisierung Radsätze und Weichen Meterspur» festgelegt. Eines in diesem Regelwerk festgelegte Radprofil ist das W98. Bei vielen Meterspurbahnen werden dieses oder daraus abgeleitete und leicht veränderte Radprofil (auch W98) eingesetzt. Diese Radprofile sind jedoch nicht verschleissoptimal auf den Kontakt Rad/Schiene abgestimmt und insbesondere für die Fahrt in engeren Bögen nicht geeignet.

Die Optimierung der Radprofile war nicht Zielsetzung bei der seinerzeitigen Erstellung der R RTE 29500. Es war damals angedacht, die Anpassung dieses Radprofils nach den Untersuchungen zur Festlegung des qR -Masses vorzunehmen. Dies wurde aber bisher in der Branche noch nicht angegangen und ist heute Bestandteil der Systemaufgabe Interaktion Meterspur. Diese Arbeiten basieren auf den teilweise positiven Erkenntnissen, welche einzelne Meterspurbahnen mit alternativen Verschleissprofilen bereits besprochen haben. Hierbei wird auch das Thema der Schwächung der Spurkränze angegangen werden müssen. Mit sinkendem Spurmass kann die äquivalente Konizität reduziert werden und erhöht damit den Sicherheitsabstand gegenüber dem instabilen Fahrwerklauf. In Analogie dazu führt auch eine grössere Spurweite zu einer kleineren äquivalenten Konizität. Das bedeutet, dass sich eine geringere Konizität einstellt je mehr Spiel der Radsatz im Gleis hat. Tiefere Konizitäten unterstützen den stabilen Fahrzeuglauf bei höheren Geschwindigkeiten und senken die diesbezüglichen Anforderungen an die Fahrwerke. In höheren Geschwindigkeitsbereichen (über 80km/h) sollte daher zuerst die Spurweite auf 1003-1005mm erweitert werden, bevor das Spurmass verkleinert wird und in der Folge der Bogenlauf wirtschaftlich verschlechtert wird (Verschleiss).

Fazit 12:

Die Radprofile in Verbindung mit der Spurweite, den Schienenprofilen in den Bereichen des Rad-Schienen-Kontaktes und der Einbauneigung der Schiene -bestimmen die Laufeigenschaften in der Geraden aber auch den Verschleiss in den Bogen. Die vorhandenen Schienenprofile und gängigen Radprofile sind, hinsichtlich Verschleiss, suboptimal und müssen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit für die jeweiligen Einsatzgebiete besser aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere sind Verschleissprofile zu entwickeln, respektive weiterzuentwickeln.

Fazit 13:

Auf Streckenabschnitten mit höheren Geschwindigkeiten (über 80km/h) sollte die Spurweite auf 1003-1005mm erweitert werden, um den Sicherheitsabstand gegenüber dem instabilen Fahrzeuglauf zu erhöhen und den Bogenlauf nicht durch andere Massnahmen (z.B. Verkleinerung des Spurradius) zu verschlechtern.

1.4.3 Teilbereich Fahrweg

1.4.3.1 Grundlagen

Auch bei der Fahrbahn entstehen gegen 50% der Lebenszykluskosten bei der Investition. Über 50% der Lebenszykluskosten entfallen auf den Betrieb (Schleifen, Stopfen, Bauteilwechsel). Die Investitionskosten des Eisenbahnoberbaus verteilen sich zu je einem Drittel auf Schienen, Schwellen (inkl. Schienenbefestigung) und Gleisschotter. Die Investitionskosten der Schienen sind proportional zum Schienenmetergewicht und der Güte, die Kosten der Schwellen zur spezifischen Schwellenmasse und die des Schotters zur Schotterquerschnittsfläche.

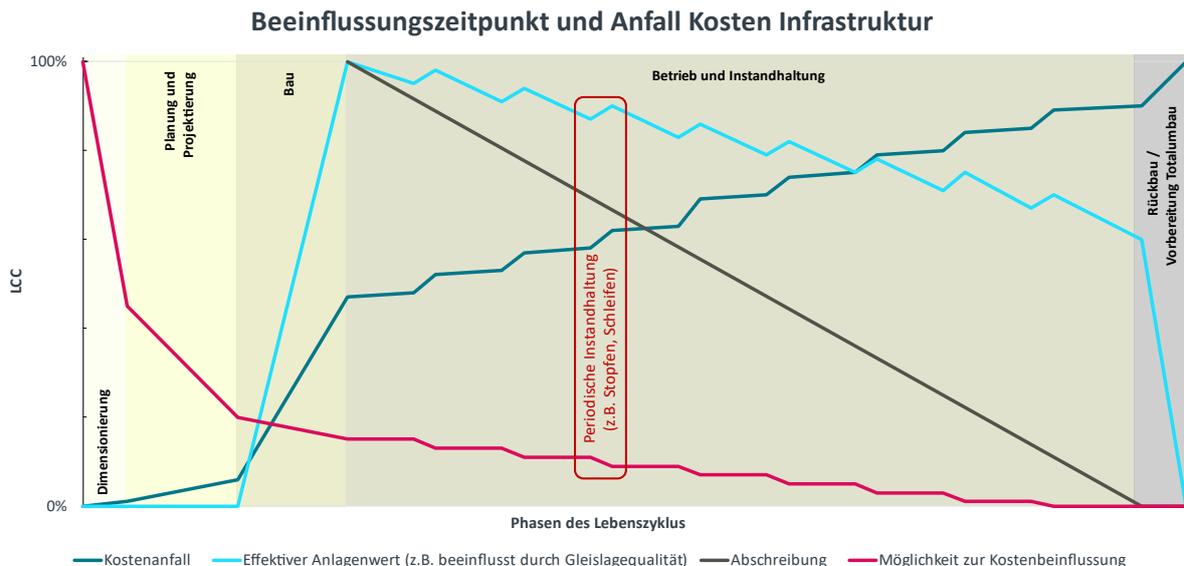


Abbildung 9: Schematische Darstellung von Beeinflussung und Anfall der Infrastrukturkosten sowie Abschreibung und effektiver Anlagenwert über den Lebenszyklus.

Die Investitionskosten steigen generell mit der maximalen Geschwindigkeit der Eisenbahnstrecke und sind abhängig von der vorgesehenen, statischen Radkraft. Das Fahrbahnsystem (Ober- und Unterbau) muss auch hier auf den Verwendungszweck abgestimmt sein. Weiter ist der Erstellungsqualität eine sehr hohe Beachtung zu schenken, da der Unterbau nicht mehr und die Schwellen und der Schotter nur noch mit sehr grossem Aufwand ersetzt werden können. Die Dimensionierung des Fahrweges und dessen Ausgangsqualität hat einen erheblichen Anteil an den Jahreskosten betrachtet über den gesamten Lebenszyklus.

Der wirtschaftliche Erfolg bei der Dimensionierung des Fahrweges hängt massgeblich von folgenden Kriterien ab:

- Die Einsatzbedingungen (Lasten) müssen bekannt sein
- Die Auswirkungen der jeweiligen Fahrwegkonstruktionen auf die Lebenszykluskosten müssen bekannt sein
- Die Investition und allfällige Mehrkosten zur lebenszyklusorientierten Systemoptimierung bei Beschaffung und Betrieb müssen finanzierbar sein
- Der notwendige, zeitliche Vorlauf zur Optimierung des Fahrwegsystems muss im Beschaffungsvorgang vorhanden sein
- Die hoheitlichen Vorgaben müssen die Optimierung zulassen oder mit vertretbarem Aufwand erfüllbar sein

- Die Fahrwegindustrie muss die notwendigen Wartungstechnologien anbieten, um die LCM-Strategien am Fahrweg auch umsetzen zu können (Zustandsdatenerhebung, Schleifen, Fräsen und mehr)
- Für eine lebenszyklusoptimierte Qualität müssen die entsprechenden Sperrpausen und Qualitätsüberwachungssysteme vorhanden sein

Generell fallen beim Fahrwegbau der Meterspurbahnen hohe Einmalkosten bedingt durch die Projektierung, das PGV, die Baustellenorganisation und -Logistik in anspruchsvollem Gelände an. Dazu kommen die Bahnersatzkosten, welche sehr unterschiedlich hoch anfallen. Diese verteilen sich direkt auf die vorgesehene Umbaulänge. Je grösser die Umbaulängen sind, desto günstiger werden diese Einmalkosten. In direktem Zusammenhang hierzu stehen die Randbedingungen, unter welchen der Umbau durchgeführt werden kann. Am kostenintensivsten ist der Umbau unter dem rollenden Rad in Nachtsperrrpausen, am günstigsten in Totsperrungen mit Umbaulängen grösser 1000m. Die Umbaubedingungen bestimmen direkt die Qualität der durchgeführten Arbeiten. Die Totsperrungen erhöhen die Ausgangsqualität des Fahrweges nachhaltig und damit direkt die Höhe der Ausgangsqualität als Basis für eine längere Nutzungsdauer (gegen 20%). Wie auch bei den Fahrzeugen kann eine Verlängerung der Nutzungsdauer eine massive Senkung der Lebenszykluskosten nach sich ziehen.

Voraussetzung zum Erreichen der vorgesehenen Nutzungsdauer oder darüber hinaus ist beim Fahrweg sowohl die Ausgangsqualität, als auch die Produktqualität, die Belastung über die Nutzungsdauer und die fachgerechte Instandhaltung.

Analog zu den Fahrzeugbeschaffungen erfolgt der Fahrwegbau auch bei den Meterspurbahnen nach Kundenwünschen. Je kleiner die Bestellmenge (Umbaulänge), desto mehr fallen die Kosten für die Produktionsvorbereitung ins Gewicht. Die Komponentenbeschaffung (Schienen/Schwellen) erfolgt innerhalb von RAILplus oft gemeinsam, was einen Skaleneffekt ermöglicht. Individualisierungen des Fahrweges, auf Wunsch der TU, schränken die Produktionslosgrössen jedoch ein. Systemkenntnisse der Fahrbahn, insbesondere der finanziellen Auswirkungen der zu treffenden Entscheide erfordern Spezialkenntnisse. Nicht jede ISB hat spezialisierte (Fahrweg-) Anlagenmanager mit dem hierzu notwendigen Know-how. Zudem ist es in der Meterspur herausfordernd den wirtschaftlich richtigen Zeitpunkt der Fahrwegerneuerung zu prognostizieren und koordinierte Beschaffungen bei den Umbauten zu erreichen da die Diagnoseinstrumente erst gerade im Aufbau sind und die ökonomischen Instrumente im Fahrweg noch bereitgestellt werden müssen.

Im Betrieb des Fahrweges fallen die Lebenszykluskosten wie Abschreibungen, die Zinsen, die Wartung und Instandsetzung an. Investition und Instandhaltung bilden miteinander kommunizierende Gefässe. Investitionen erstellen Fahrbahnqualitäten, Instandhaltung sichert lange Liegedauern als Grundvoraussetzung für jede Wirtschaftlichkeit. Dabei darf man nicht dem Trugschluss anheimfallen, dass mehr Unterhalt eine lebenszyklusorientierte Lebensverlängerung bewirkt. Es gelingt zwar das Gleis mit (teuren) Instandhaltungsmassnahmen länger zu halten, aber die Unzulänglichkeiten aus der Konzeption und Produktqualität oder (früher) vernachlässigtem Unterhalt können damit nicht mehr wirtschaftlich ausgeglichen werden. Der Unterhalt entspricht über den Lebenszyklus einer wichtigen Pflichtübung, die Kür ist dabei das wirtschaftliche Optimum zwischen Konzeption, der richtigen Produktequalität und der Instandhaltung in Übereinstimmung zu bringen.

Schematische Entwicklung der LCC über die Betriebsdauer einer Anlage

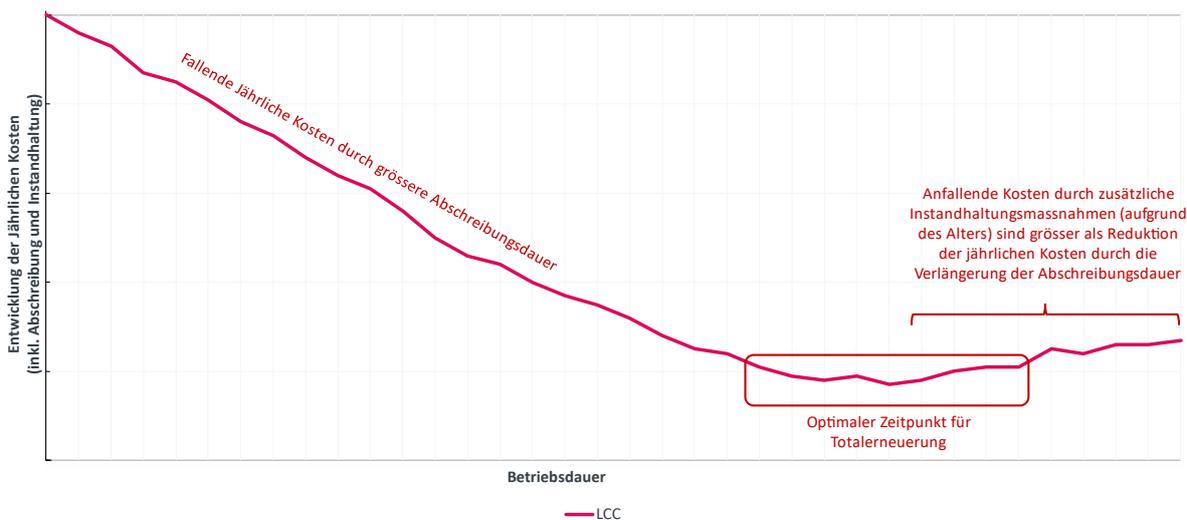


Abbildung 10: Beispiel zur Ermittlung des optimalen Erneuerungszeitpunkt

Die Entscheidung, ob eine umfangreiche Fahrwegerneuerung erforderlich wird, ist keine rein technische Frage. Vielmehr muss der wirtschaftlich sinnvollste Zeitpunkt für die Massnahmen der Instandhaltung gefunden werden. Diese Abwägung ist eine der zentralen Aufgaben des lebenszyklusorientierten Anlagenmanagements der Fahrweginfrastruktur. Erreicht wird dies unter anderem durch eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung über die Nutzungsdauer. Dadurch kann der wirtschaftlich optimale Re-Investitionszeitpunkt errechnet werden und somit ein Anstieg der Instandhaltungskosten verhindert werden. Aus ökonomischer Sicht ist zu beachten, dass eine höhere Langlebigkeit und Belastbarkeit der Gleisinfrastruktur grundsätzlich zu einer initialen Erhöhung der (Re-)Investitionskosten durch konformen Unterbau, Betonschwellen, Schwellenbesohlung, höheren Güten bei der Materialisierung der Schienen, etc. führt. Auf längere Sicht hat jedoch eine sinkende Ausfallwahrscheinlichkeit, eine Verminderung der Instandhaltungskosten und eine Erhöhung der Nutzungsdauer und damit bessere Lebenszykluskosten zur Folge. Dies immer unter der Bedingung, dass nicht im Laufe der Nutzungsdauer grössere Änderungen am Fahrweg vorgenommen werden, welche zu einer vorzeitigen Desinvestition führen oder fehlender Wartung mit einem vorzeitigen Produktzerfall.

Fazit 14:

Eine auf die optimale Interaktion abgestimmte Konzeption und Materialisierung des Fahrweges, verbunden mit einer hohen Ausgangsqualität führt bei fachgerechter Wartung und Instandsetzung zu einer langen, verlässlichen Nutzungsdauer und damit zum wirtschaftlich besten Fahrbahnsystem.

Neben der Erneuerung (Re-Investition) lohnt es sich die Instandhaltung noch etwas ausführlicher zu betrachten.

Die wichtigste Unterhaltmassnahmen des Fahrweges sind:

- Das Schienenschleifen (zur Beseitigung von Schäden meist in Form von Rissen sowie der Herstellung einer gewünschten Geometrie des Schienenkopfs zur Optimierung des Kontakts Rad/Schiene)
- Das Stopfen des Schotteroberbaus, zur Regulierung der Lage des Gleisrosts und zur Beseitigung von Hohlstellen
- der Bauteilewechsel (Schienen, Zwischenlagen, Befestigungen, Herzstücke, halbe Zungenvorrichtungen)
- Sicherstellen der Funktionalität der Entwässerungen

1.4.3.2 Schienenschleifen

Der grosse Vorteil des Rad/Schiene-Systems ist der niedrige Rollwiderstand des Rades auf der Schiene. Wegen der geringen Kontaktflächen und der dadurch bedingten sehr hohen Kontaktspannungen sind bei Rad und Schiene Werkstoffe notwendig, welche grossen Belastungen (auf der Fläche eines Fünfrappenstücks) standhalten müssen. Es entstehen hohe Spannungen, die vor allem bei der Fahrt in Bögen weit über 1000 N/mm^2 liegen können. Die Beanspruchungen vor allem bei der Bogenfahrt sind als Folge der Überlagerung von Normal- und hohen Tangentialkräften dabei so gross, dass sich sowohl das Rad als auch die Schiene in den Kontaktzonen plastisch verformen können. Dabei können sich in oberflächennahen Bereichen Risse bilden, welche sich unter gewissen Bedingungen vergrössern und in der Folge zu grösseren Schädigungen an den Fahrflächen ausbilden können. Dies geschieht insbesondere dann, wenn zu den Normalkräften (Radaufstand) auch Tangentialkräfte (Kraftschlusskräfte aus dem Bogenlauf sowie Brems- und Antriebskräfte) zu übernehmen sind.

Durch die hohen Belastungen der Schienen kommt es zu unterschiedlichen Arten von Schienenfehlern, wie grössere Ausbrüche im Bereich der Schienenfahrkanten, Nierenbrüche, Rissen an der Schienenoberfläche, Head Checks, Ausbröckelungen, Squats, Riffel und Schleuderstellen.

Erfahrungen aus der Praxis der Normalspur zeigen, dass hochbelastete Bögen mit grösseren Bogenradien einer Rollkontaktermüdung unterliegen. In Folge zu geringem Verschleissabtrag erfolgt ein erhöhtes Risswachstum bis hin zu Schienenbrüchen. Aus diesem Grund und aus den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit (geringer Abtrag beim Schienenschleifen) müssen diese Risse in einem Frühstadium beseitigt werden. In kleineren Radien erzeugen Schlupfwellen auf der bogeninneren Schiene eine erhöhte Komponentenbeanspruchung und eine rasche Gleislageverschlechterung mit Schotterzerstörung und deutlich erhöhten Belastungen des Unterbaus. Die Zerstörungen betreffen mit dem Schotter und dem Unterbau in erster Linie die kostenintensivsten Elemente des Fahrweges.

Deshalb müssen höher belastete Schienen, dies sind insbesondere Gleise mit Schlupfwellen und Head Checks, periodisch geschliffen werden. Als Richtwert kann davon ausgegangen werden, dass rund alle drei Jahre (je nach Belastung) im Innenstrang geschliffen werden sollte (stark belastungsabhängig). In engen, stark belasteten Bögen manchmal auch jährlich. Das zyklische Schleifen nach strategischen Vorgaben auf Basis von LCC-Analysen führt so zu einer optimalen Schienenliegedauer und minimalen Zerstörung der Komponenten des Ober- und Unterbaus.

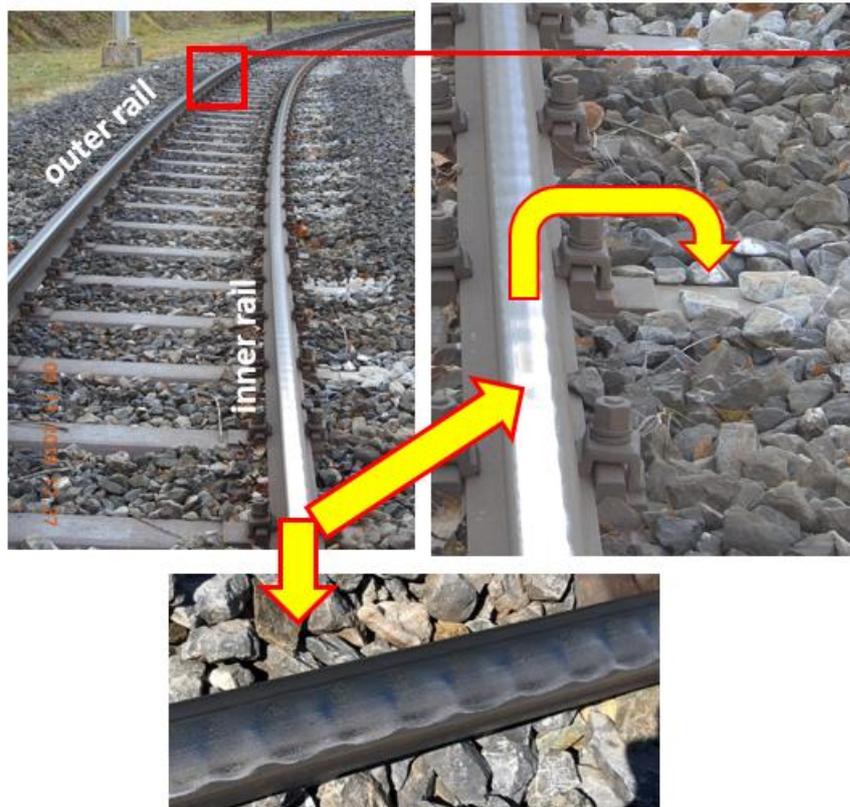


Abbildung 11: Schrupfwellenbildung im Innenstrang mit Schienen- und Schotterzerstörung (Bild: Roland Müller)

In einer Frühphase können diese Schienenfehler durch Schleifen mit dem Schleifzug behoben werden. Das präventive Schleifen sollte erfolgen, bevor die Risstiefe 0.2mm beträgt und die Risse in die Tiefe der Schiene vordringen (abtauchen) können. Weiter verhindert das Schienenschleifen die dynamische Beanspruchung von Fahrzeug und Fahrweg. Die resultierende Schwingungsbeanspruchung kann ansonsten zu einer beschleunigten Schädigung von Schiene, Schienenbefestigung, Schwelle und Schotter führen. Die Beseitigung von Fahrflächenunebenheiten durch zyklisches Schienenschleifen leistet einen Beitrag zur Erhöhung des Fahrkomforts und zur Reduzierung der Lärm- und Erschütterungsemissionen des Schienenverkehrs. Eine damit hoch wirtschaftliche Massnahme.

Fazit 15:

Das regelmässige, präventive Schienenschleifen während der Liegedauer der Schienen:

- erhöht die Liegedauer der Schienen, der Befestigungen und Schwellen
- verlängert die Durcharbeitungszyklen des Gleises und schont Schotter und Unterbau
- verbessert die Laufruhe der Fahrzeuge
- vermindert die Lärmentwicklung

Das Schienenschleifen ist hoch wirtschaftlich, sofern es richtig angewandt und qualitativ hochwertig ausgeführt wird.

Zum Beispiel verursachen Schrupfwellen auf dem Schienenkopf bei Überfahrt durch einen Reisezugwagen mit 5 t Radlast, davon 15% ohne Primärfederung also ungefederter Masse) bei 80 km/h eine Radkraftherhöhung um gegen 50%. Die Anwendung des Potenzgesetzes der Schotterpressung führt bei Ansatz der (optimistischen) 2. Potenz (eher 3. Potenz) zu einer mehr als doppelt (2,16-fach) so schnellen Verschlechterung der Gleislagequalität. Dies entspricht einer Halbierung des Stopfzyklus. Dies bei massiver Lärmentwicklung.

Das Neuschienenschleifen (nach dem Schienenwechsel) dient der Beseitigung der im Herstellungsprozess entstandenen kohlenstoffarmen Randschicht der Schiene und der

Beseitigung von Fahrflächenschäden aus dem Baustellenbetrieb. Darüber hinaus wird durch das Neuschienenschleifen ein gleichmässiger Spurkanal hergestellt.

Generell ist zu erwähnen, dass heute noch kein Regelwerk Technik Eisenbahn (RTE) zum Schienenschleifen in der Meterspur existiert. Dieses ist auf Basis der zukünftigen Erkenntnisse aus der Systemaufgabe Interaktion zu erarbeiten.

Nach dem Schienenschleifen ist zu berücksichtigen, dass vor allem in engen Kurven der Schmierfilm der Spurkranzschmierung fehlt und vor Inbetriebnahme wieder aufgetragen werden muss, damit ein übermässiger Verschleiss an der Fahrkante und insbesondere auch an den Spurkränzen vermieden wird bis es den Fahrzeugen gelingt durch die Spurkranzschmierung wieder einen genügenden Schmierfilm aufzutragen. Bereits einige, wenige nicht geschmierte Kurven haben gezeigt, dass Spurkränze ganze Fahrzeugflotten innert kürzester Zeit grounden können.

Fazit 16:

Nach dem Schienenwechsel respektive Schienenschleifen ist eine Initialschmierung der Schienenflanke in engen Radien unerlässlich um die vorgesehene Laufleistung der Radsätze (Spurkränze) und Lebensdauer der Schienen zu erreichen.

Sonderprofile (asymmetrische Profile durch Schienenschleifen)

Als Sonderprofile werden Schienenprofilformen bezeichnet, die von der symmetrischen Querschnittsgeometrie walzener Schienen abweichen. Sonderprofile werden zur Beeinflussung der Berührungspunktlage des Rades auf der Schiene eingesetzt, um die Radsatzführung (insbesondere in Bögen mit kleinen Halbmessern) zu beeinflussen, Verschleiss zu reduzieren und einer Rollkontaktermüdung vorzubeugen. Sonderprofile können beim Neuschienenschleifen oder im Rahmen des präventiven Schleifens aufgebracht werden. Je nach Profilveränderung muss geprüft werden, ob ein Fräsen nicht die wirtschaftlichere Lösung darstellt oder die Schienen bereits im Sonderprofil geliefert werden können. Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit wird im Rahmen der Systemaufgabe Interaktion geprüft.

Lärmverminderung durch Schienenschleifen

Die Reduzierung des Eisenbahnlärms erlangt auch bei den Meterspurbahnen eine zunehmende Bedeutung. Durch Gewährleistung einer kontinuierlich in der Gleislängsrichtung ebenen Schienenfahrfläche leistet regelmässiges Schienenschleifen einen aktiven Beitrag zur Reduzierung der Luft- und Körperschallemissionen.

1.4.3.3 Stopfen (Regulierung der Gleislage)

Durch das Stopfen wird das Gleis wieder in die geometrisch korrekte Lage gebracht.

Unter einer ausreichenden Hebung wird der Gleisrost gerichtet, unterstopft und damit wieder definierte Auflager unter den Schienen hergestellt (Zweipunktauflage der Schwellen, jeweils dort wo die Schienen auf den Schwellen aufliegen). Diese zwei (Schotter-) Auflager pro Schwelle vermeiden Instabilitäten der Lage, wie sie durch das Schwellenreiten (Einpunktauflage zwischen den Schienen) entstehen können. Das Schwellenreiten kann in Extremfällen zu massiven Ermüdungserscheinungen in den Schienen führen und bereits angerissene Schienen zum Bruch führen. Ein zyklisches Stopfen wird in der Regel alle 5 bis 10 Jahre durchgeführt.

Es ist bekannt, dass die Verschlechterungsraten der Gleislage in bestimmten Gleisabschnitten wie ein Fingerabdruck sind. Die erreichte Qualität eines Gleisabschnittes bei der Erneuerung bestimmt sein Verhalten auf die Dauer. Ein schlechter Gleisabschnitt wirkt sich in der Folge während seiner Lebensdauer durch aufwendige und kostspielige Instandhaltung (Stopfen) bemerkbar. In der Anfangsqualität und der Verschlechterungsrate spiegelt sich die Eignung der Gleiskomponenten für die herrschende Belastung wider. Die Qualität wird dabei aber auch durch die bei der Erstellung des Planums und des Oberbaus verwendeten Methoden und Maschinen entscheidend beeinflusst. Damit zeigt sich, dass Unterbau (inklusive

Entwässerung) und Oberbau ein in sich zusammenhängendes System bilden und gesamthaft optimiert werden müssen.

Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Gleisregulierung ist ein tragfähiger Unterbau mit guter Entwässerung und ein unverschmutztes Schotterbett damit nicht durch die Verschmutzung der Reibungswinkel zwischen den Schotterkörnern vermindert wird. Ansonsten wirken die Feinanteile wie ein Schmierfilm und die Lastverteilung wird negativ beeinflusst. Die Stopfung hält ungenügend lange und ist eine finanzielle Verschwendung.

Fazit 17:

Ein qualitativ hochwertiger Unter- und Oberbau ermöglicht eine qualitativ hochwertige Gleislage. Durch regelmässiges Ausrichten und Unterstopfen werden die dynamischen Kräfte verringert und damit die Lage und die vorgesehene Lebensdauer sowie der optimale Lebenszyklus unterstützt.

1.4.3.4 Bauteilewechsel – Schienenwechsel/Schwellenwechsel

In der Regel und insbesondere bei mangelhafter Spurkranzschmierung wird in engeren Radien die Aussenschiene an der Fahrkante wesentlich -stärker abgenutzt. Auch bei guter Schienenpflege ist über den Lebenszyklus des Fahrweges manchmal ein Schienenwechsel notwendig. Wirtschaftlich optimal ist, wenn dieser im halben Lebenszyklus oder bei einem Drittel stattfinden kann. Gleichzeitig sind die Kunststoffzwischenlagen zwischen Schienen und Schwellen zu ersetzen damit die Elastizität im System wieder hergestellt werden kann. Einzelschwellenwechsel sind in der Regel hoch unwirtschaftlich, ausser das Gleis soll auf einem tiefen Qualitätslevel in untergeordneter Bedeutung noch einige Zeit weiterbetrieben werden.

1.4.3.5 Sicherstellen der Funktionalität der Entwässerungen

Eine stabile Gleislage setzt einen stabilen Unterbau voraus. Oberflächennahes Wasser kann die Böden/den Unterbau aufweichen und so die Tragfähigkeit reduzieren. Entwässerungsanlagen im Bereich des Fahrweges sind unverzichtbar. Die Aufgabe der Entwässerungsanlagen ist es das Meteorwasser aufzunehmen und ungebundenes Wasser aus dem anstehenden Boden zu entziehen. Dieses ist auf schnellstem Weg abzuführen. Auch bei den Entwässerungsanlagen sind die vorbeugenden Maßnahmen zur Erhaltung eines trockenen Fahrweges von entscheidender Bedeutung. Dies beinhaltet insbesondere die Vegetationskontrolle der Strecke sowie die Wartung der vorhandenen Entwässerungsanlagen.

Fazit 18:

Wasser ist der Feind Nummer Eins des Fahrweges. Ohne eine gute, funktionierende Wasserhaltung sind die besten lebenszyklusorientierten Massnahmen wirkungslos.

1.5 Lösungsansätze zur Sicherstellung der Gesamtwirtschaftlichkeit im System Fahrzeug / Fahrweg

1.5.1 Vorbemerkung

Die nachfolgenden Lösungsansätze spiegeln den Stand des heutigen Wissens aus den nationalen und internationalen Recherchen sowie den bisherigen Arbeiten der Systemaufgabe Interaktion Meterspur. Die Systemführerschaft hat versucht das derzeit gültige Wissen zusammenzutragen und dieses mit dem Blick auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Meterspurbranche zur Verfügung zu stellen. Die aufgeführten Lösungsansätze sind auf den konkreten Anwendungsfall zu überprüfen damit die wirtschaftliche Optimierung voll zum Tragen kommen kann.

Grundsätzlich muss erwähnt werden, dass die Kenntnisse um ein nachhaltiges Assetmanagement der Teilsysteme Fahrzeug und Fahrweg eine Grundvoraussetzung für ein wirtschaftliches Gesamtsystem sind. Jedes der Teilsysteme muss ausnahmslos in sich wirtschaftlich funktionieren, bevor die Gesamtsystemoptimierung angegangen und die erwarteten finanziellen Ergebnisse erzielt werden können.

1.5.2 Lösungsansätze zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit im Teilsystem Fahrzeuge

1.5.2.1 Gemeinsame Konzeption Fahrwerke

In der Koordination der Rollmaterialinvestitionen und dadurch auch bei den Lebenszykluskosten, erkennt auch die Eidgenössische Finanzkontrolle (EFK) ein bedeutendes Einsparpotenzial (siehe Bericht «Querschnittsprüfung der Beschaffung von Rollmaterial bei den Bahnen» vom 17. August 2018). Die terminliche Koordination und die gemeinsame Ausschreibung der RPV-Flottenerneuerungen (koordinierte Flottenstrategie) würde die Bildung wirtschaftlicherer Losgrößen ermöglichen und auch die nachhaltige Umsetzung der Erkenntnisse aus der Systemaufgabe Interaktion ermöglichen. Weiter ist eine technische Harmonisierung anzustreben. Die Interaktion betreffend interessiert in erster Linie eine Standardisierung des Gesamtfahrzeugdesign und der Fahrwerkkonzepte. Dies unter spezieller Betrachtung der Auslegung der Achslasten, der Drehgestellbauarten, der Radprofile und Radwerkstoffe, sowie der Antriebskonzepte. Heute bestehen bei den Adhäsionsbahnen rund sechs (theoretisch) verschiedene Fahrwerkkonzepte. Bei den Zahnradbahnen kommen weitere dazu.

Die heutigen Fahrwerke der Meterspurbahnen sind generell nicht bogenfreundlich konstruiert. Die Achslasten steigen stetig an und nähern sich immer mehr der 16 Tonnen (brutto) Schwelle. Ab rund 13 Tonnen Achslast beginnen die grossen Verschleisserscheinungen Bereich der Radienklassen unter 250m.

Lösungsansatz 1 – gemeinsame Fahrwerkplattform:

Unter Einbezug der Besteller, der Fahrzeugindustrie und der Meterspurbahnen sollte eine langfristig stabile, gesamtwirtschaftliche Fahrwerkplattform für Adhäsions- und Zahnradbahnen, basierend auf den Erkenntnissen der Systemaufgabe, entwickelt werden.

1.5.2.2 Materialisierung der Fahrwerke

Im Rahmen der Materialwahl kann heute davon ausgegangen werden, dass hochwertige Stahlqualitäten der Räder am wirtschaftlichsten zur Anwendung gelangen können.

Lösungsansatz 2 – hochwertige Radmaterialien

Bahnen mit hohem Verschleiss, bedingt durch enge Bogenradien sollten aus wirtschaftlichen Überlegungen den Einsatz sehr hochwertiger Stahlqualitäten der Räder prüfen.

1.5.2.3 Instandhaltung Fahrzeuge

Die Standardisierung der Laufwerkkonzepte wird das Wissensmanagement und die Bewirtschaftung der Ersatzteile deutlich vereinfachen. Gemeinsames Wissens- und Ersatzteilmanagement ist eine Voraussetzung zur Steigerung der Gesamtwirtschaftlichkeit. Das detaillierte Interaktionswissen in diesem Zusammenhang gehört nicht zum Kerngeschäft der Transportunternehmungen und könnte ebenfalls zentral bewirtschaftet werden.

Lösungsansatz 3 – gemeinsames Wissensmanagement Instandhaltung Fahrzeuge:

Die Erkenntnisse aus der Systemaufgabe werden grosse wirtschaftliche Vorteile im Bereich der Fahrzeuginstandhaltung ausweisen, wenn das Wissen in der Praxis implementiert werden kann. Dieses Wissen sollte in einem Kompetenzcluster vertieft und gepflegt werden.

Um eine aktive, präventive oder zustandsbezogene Radsatzinstandhaltung über den Lebenszyklus betreiben zu können sind Echtzeitkenntnisse über den Zustand und die Zustandsentwicklung der Radprofile unerlässlich. Bis in den Bereich kleinerer Kurvenradien hinein ist der Einfluss der Rad- und Schienenprofile von grosser Bedeutung für den Kontakt Rad/Schiene und damit beim zu erwartenden Verschleiss an Rädern und Schienen. Eine gemeinsame Radsatzdatenbank könnte die Informationstiefe verbessern, die Datenqualität erhöhen, die Möglichkeit zur Anwendung des Interaktionswissens sicherstellen und damit die Wirtschaftlichkeit nachhaltig steigern.

Lösungsansatz 4 – einheitliche Radsatzdatenbank:

Maximale Radsatzlaufleistungen sind vom richtigen Reprofilierungszeitpunkt und dem richtigen Radprofil für den jeweiligen Verwendungszweck abhängig. Eine gemeinsame Radsatzdatenbank verbunden mit dem notwendigen Wissen, könnte die Informationstiefe verbessern, die Datenqualität erhöhen, die Möglichkeit zur Anwendung des Interaktionswissens sicherstellen und damit die Wirtschaftlichkeit nachhaltig steigern.

1.5.2.4 Fahrzeuge im Betrieb

Die stark motorisierten Fahrzeuge mit den sehr gut entwickelten Traktionsregelungen verleiten im Betrieb dazu, dass die maximal möglichen Kräfte unter Inkaufnahme erhöhter Schlupfwerte auf die Schienen übertragen werden. Dies ungeachtet, ob dies im konkreten Fall notwendig ist oder nicht. Das Verkehren mit grösserem Schlupf erzeugt deutliche mehr Verschleiss an Rad und Schiene.

Lösungsansatz 5 – Reduktion des Schlupfes:

Bei neuen Fahrzeugen mit hohen Anforderungen an die Zugkraft und Beschleunigung (max. $0,8\text{m/s}^2$) sollten aus Lebenszyklusüberlegungen Gruppenantriebe vermieden werden und zusätzlich angetriebene Achsen (zum Beispiel Boosterdrehgestelle) geprüft werden. Bei bestehenden Fahrzeugen, bei welchen die Performance der Traktion gut ausreicht, sollte eine Beschränkung des Schlupfs erwogen werden (allenfalls mit bewusster Anforderung durch das Lokpersonal).

1.5.3 Lösungsansätze zur Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit im Teilsystem Fahrweg

1.5.3.1 Konzeption des Fahrweges

Da die Investitionskosten einen grossen Anteil der Lebenszykluskosten des Fahrweges bilden, muss die Verlängerung der Lebensdauer der Gleiskomponenten im Vordergrund stehen.

Hohe Initialaufwände bei der Re-Investition (PGV, Bauinstallationen, etc.) und die Notwendigkeit nach einer hohen Bauqualität (Ausgangszustand) bevorzugen aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen weiter grosse Baulose unter einer jeweiligen Totalsperre.

Ein Standardaufbau des Fahrweges nach D RTE 22540 (4.1 mit HMT-Planie) ist nach heutigem Wissen, auf lange Sicht auch die wirtschaftlichste Lösung.

Neben einer guten Entwässerung und einem Normgerechten Unterbau zeichnet sich ab, dass eine Sperrschicht in Form von AC-Rail aus wirtschaftlicher Sicht zu bevorzugen ist, gilt es doch die Gesamtlebensdauer des Fahrweges maximal zu erhöhen.

Lösungsansatz 6 – Fahrwegaufbau:

Ein Standardaufbau des Fahrweges nach D RTE 22540 mit HMT-Planie ist aus lebenszyklusorientierter Sicht zu bevorzugen.

Die 1000mm Spurweite sollten nicht unterschritten werden. Auf geraden Strecken mit Geschwindigkeiten grösser 80km/h sollte eine Spurweite von 1002-1004mm sichergestellt werden um einen stabilen Fahrzeugaufbau auch bei ungünstigen Rad/Schiene-Konfigurationen sicherstellen zu können. Ein plötzliches Auftreten von instabilem Fahrzeugaufbau kann ansonsten zu kostenintensiven Notmassnahmen an den Fahrzeugen und am Fahrweg führen.

Lösungsansatz 7 – Spurweite in Geraden:

Auf geraden Streckenabschnitten, auf welchen mehr als 80km/h gefahren wird, sollte eine Spurweite von 1002-1004mm angestrebt werden, um kostenintensive Massnahmen zur Stabilisierung der Fahrzeuge zu verhindern.

1.5.3.2 Materialisierung des Fahrwegs

Bei mittleren und höheren Belastungen, bei welchen der Einsatz von Betonschwellen grundsätzlich wirtschaftlicher ist, sollte der Einsatz der Schwellenbesohlung aus Lebenszyklusüberlegungen zwingend gewählt werden. Bei schwächeren Belastungen und in engen Radien unter 250m ist beim Einsatz von Betonschwellen Vorsicht geboten (Steifigkeit des Fahrweges). Hier sollte das Gesamtsystem des Oberbaus besonders gut in sich abgestimmt werden. Bei schwächeren Belastungen und in sehr engen Bögen kann der Einsatz von Stahl- oder Holzschwellen durchaus gesamtwirtschaftlich sein (wird im Rahmen der Systemaufgabe noch untersucht).

Lösungsansatz 8 – Schwellen:

Kommen Betonschwellen zum Einsatz muss der Unterbau den Standardvorgaben entsprechen und es sollten nur noch Schwellen mit Schwellenbesohlung verbaut werden (unabhängig vom Einbauort). Dies gilt auch für Betonschwellenweichen, wo unterschiedliche Steifigkeiten bei der Besohlung einzusetzen sind.

Bei schwachen Belastungen in Zusammenhang mit engen Radien können Holz- oder Stahlschwellen in Betracht gezogen werden.

Bei den Schienen steht das Standardprofil 46E1 sicherlich wirtschaftlich im Vordergrund. Bei der Verwendung grösserer Profile ist der Spurweite und dem Rad/Schiene-Kontakt grosse Beachtung zu schenken, um nicht übermässigen Verschleiss zu produzieren oder instabiles Verhalten der Fahrzeuge hervorzurufen.

In Kurven ist die Verwendung von Schienen mit der Güte 350HT generell und unter 250m auch 400HT am wirtschaftlichsten. Ist der Innenstrang infolge (verzögert) auftretender Schlupfwellen trotzdem zu schleifen sollte beachtet werden, dass nicht automatisch der Aussenstrang auf Neuprofil geschliffen wird.

Wie vorab erwähnt ist das zyklische Schienenschleifen von grosser wirtschaftlicher Bedeutung. In Kurven ist jedoch darauf hinzuwirken, dass die sich im Aussenstrang eingestellten Verschleissprofile nicht beseitigt und in den Neuzustand zurückversetzt werden. Wirtschaftlich ist dies suboptimal, da die Rad/Schiene-Paarung versucht dieses Verschleissprofil wieder herzustellen. Hingegen muss der Innenstrang mit der Riffel/Wellenbildung bearbeitet werden. Vorschläge für die optimalen Schienenprofile sind in Erarbeitung.

Lösungsansatz 9 – Schienengüten:

In Kurven sollte eine hohe Schienengüte von 350HT (unter 250m = 400HT) , eingesetzt werden. Diese Stahlgüten unterstützen eine optimale Gesamtwirtschaftlichkeit, sofern die Aussenschienen nicht oder nicht im Neuprofil reprofiliert werden.

1.5.3.3 Instandhaltung des Fahrweges

Bei der Instandhaltung des Fahrweges ist eine optimale und stabile Terminierung mit hoher Ausführungsqualität der beste Garant durch Stabilität in der Bauausführung und Verlängerung der Nutzungsdauer die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

Lösungsansatz 10 – Stabile Planung und hohe Ausführungsqualität:

Eine langfristig stabile Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung, verbunden mit einem guten Qualitätsmanagement erhöht die Wirtschaftlichkeit massgeblich.

Ein periodisches Stopfen und Schleifen ist angezeigt und aus wirtschaftlichen Überlegungen zum richtigen Zeitpunkt vorzunehmen.

Lösungsansatz 11 – Stopfen und Schleifen

Stopfen und Schleifen sind die wichtigsten, periodischen Instandhaltungsmassnahmen, welche die Lebensdauer sicherstellen oder verlängern können und damit die Voraussetzung für eine hohe Wirtschaftlichkeit sind.

Eine regelmässige Fahrwegdiagnose und das damit zusammenhängende Assetmanagement des Fahrweges hilft die Prognosegenauigkeit und damit die richtigen Massnahmen zur richtigen Zeit am Fahrweg zu eruieren (wirtschaftlichster Zeitpunkt).

Lösungsansatz 12 – Einheitliche Fahrwegdiagnose und Fahrwegdatenbank:

Der wirtschaftlichste Zeitpunkt zur Instandhaltung und Erneuerung des Fahrweges muss prognostizierbar sein und die notwendigen Erkenntnisse zum Umfang der Arbeiten liefern. Eine gemeinsame Fahrwegdiagnose und Fahrwegdatenbank, verbunden mit dem notwendigen Wissen, verbessert die Informationstiefe , erhöht die Datenqualität , schafft die Möglichkeit zur Anwendung des Interaktionswissens und steigert damit die Gesamtwirtschaftlichkeit nachhaltig.

1.5.4 Gesamtheitliche Lösungsansätze

1.5.4.1 Sehr enge Bögen

In engsten und engen Bögen werden nur neue Fahrwerkkonstruktionen mit einer aktiven Radsatzsteuerung verschleissarm verkehren können. Ob dies gesamtwirtschaftlich gesehen Sinn macht muss noch eruiert werden. So oder so werden auch Nachrüstlösungen an den Drehgestellen und/oder neue Rad/Schiene Profile die Situation zwar lindern aber die Ursachen nicht beseitigen. Bei Bahnen mit vielen Radien unter rund 250m und Steigungen bis 45‰ steht kurz- bis mittelfristig die Schienenkopfkonditionierung von den Fahrzeugen aus zur Verfügung, um schnell wirtschaftliche Verbesserungen erzielen zu können. Eine weitere Voraussetzung besteht darin, dass durch die Spurkranzschmierung ein dauerfester Schmierfilm an der bogenäusseren Schienenkante sichergestellt wird.

Lösungsansatz 13 – Die Schienenkopfkonditionierung und Spurkranzschmierung

Zur Reduktion der Verschleisserscheinungen an Rad und Schiene steht bei Bahnen mit vielen engen Bogen kurz- bis mittelfristig der Einsatz der Schienenkopfkonditionierung vom Fahrzeug aus zur Verfügung. Eine gut funktionierende Spurkranzschmierung ist Pflicht.

1.5.4.2 Rad/Schiene-Profile

Die heutigen Rad/Schienenprofile (Beispiel W98 zu 46E1 und 54E2) sind im Neuzustand hinsichtlich Verschleiss nicht kompatibel. Verschleissprofile für verschiedene Anwendungsbereiche (kurvenreich, Gerade mit erhöhter Fahrgeschwindigkeit) sind zu entwickeln.

Lösungsansatz 14: Natürlich entstandene Verschleissprofile beibehalten

Bis optimierte Verschleissprofile Rad/Schiene vorliegen sollten die Aussenschienen mit natürlich entstandenen Verschleissprofilen möglichst nicht in Richtung Neuzustand geschliffen werden. Weiter ist der Einbau von Schienen 54E2 in Kurven nach Möglichkeit zu unterlassen und in den Geraden mit genügend Spurweite (1004mm) zu versehen. Bei den Rädern von Fahrzeugen auf kurvenreichen Strecken liegen erste Verschleissprofile vor, welche zu Betriebsversuchen zum Einsatz gelangen könnten.

1.5.4.3 Lösungsansätze hoheitliche Vorgaben

Lösungsansatz 15 – Hoheitliche Vorgaben (EBG/EBV/AB-EBV/NZV):

Die hoheitlichen Vorgaben müssen auch Steuermechanismen zur Gewährleistung der Gesamtwirtschaftlichkeit Fahrzeug/Fahrweg enthalten und dürfen sich nicht nur auf die Gewährleistung der Sicherheit beschränken. Technische Details sind in den RTE zu regeln (siehe Lösungsansatz 17).

1.5.4.4 Wissensmanagement

Die zu Beginn der Systemaufgabe Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur aufgestellten Annahmen bestätigen sich laufend und werden durch neues Wissen ergänzt. Das vorhandene und neue Wissen ist ein Schlüssel für eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung. Dieses muss weiter gepflegt, entwickelt und wo vorliegend in die Branche transferiert werden. Hierzu sind die nachfolgenden Lösungsansätze angezeigt:

Lösungsansatz 16 – Rad/Schiene-Know-how

Es braucht bei den Meterspurbahnen ein Kompetenzzentrum Rad/Schiene, das die Erkenntnisse aus der Systemaufgabe übernimmt, pflegt, weiterentwickelt und die Beratung der Bahnen sicherstellt.

Lösungsansatz 17 – RTE

Die vorgesehene Überführung des neuen Wissens in die RTE muss stringent weitergeführt werden. Insbesondere sind nach dem heutigen Wissensstand folgende, neuen RTE's zu erstellen:

- RTE Schienenkopfkonditionierung Meterspur
- RTE Spurkranzschmierung Meterspur
- RTE Schienenschleifen Meterspur

Bestehende RTE's sind mit dem neuen Wissen zu aktualisieren.